

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Vliv moderních korekčních systémů naklápění řezné hlavy
na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním
abrazivním vodním paprskem

Effects of Modern Corrective Systems Based on Cutting Head
Tilting on Quality and Dimensions of Workpiece during 2D Cutting
by High-Speed Abrasive Water Jet

Student:

Jakub Ormaniec

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Ormaniec**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie

Téma: **Vliv moderních korekčních systémů naklápění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem**
Effects of Modern Corrective Systems Based on Cutting Head Tilting on Quality and Dimensions of Workpiece during 2D Cutting by High-Speed Abrasive Water Jet

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Základy technologie vysokorychlostního vodního paprsku.
3. Důvody pro použití korekčních systémů při výrobě obrobku.
4. Experimentální ověření vlivu korekčních systémů.
5. Analýza a interpretace naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [3] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [4] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

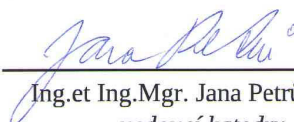
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 1. května 2014


.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 1. května 2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jakub Ormaniec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sousedská 60, Orlová – Lutyně, 73514.

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. a konzultantce paní Ing.et Ing.Mgr. Janě Petrů, Ph.D. za poskytnutí cenných rad pro zpracování bakalářské práce. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu při celém studiu na vysoké škole.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ormaniec, J. *Vliv moderních korekčních systémů naklápění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem: Bakalářská práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 54 s. Vedoucí práce: Sitek, L.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá nekonvenčními metodami obrábění se zaměřením na řezání abrazivním vodním paprskem. Teoretická část obsahuje vysvětlení základních pojmů a samotného procesu řezání. Popisuje jak stroj, který je k řezání určený, tak jednotlivé typy paprsku nebo parametry ovlivňující hloubku a kvalitu řezu. Neopomíná ani využití této metody v praxi. V závěru je pak kladen důraz na jednotlivé korekční systémy, tedy Materiálové řízení rychlosti, Dynamickou poloměrovou korekci a systém Progressjet. Praktická část je založena na vytvoření čtyř vzorků ze stejného materiálu, přičemž na každý z nich byl užitý jiný korekční systém, případně byl vzorek vytvořen bez jakékoliv korekce. Z následného měření kvality a rozměrů obrobků bylo zjištěno, že kvalitativně nejlepší byl vzorek vytvořený pomocí systému Progressjet.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Ormaniec, J. *Effects of Modern Corrective Systems Based on Cutting Head Tilting on Quality and Dimensions of Workpiece during 2D Cutting by High-Speed Abrasive Water Jet : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 54 p. Thesis head: Sitek, L.

This bachelor's paper is focused on unconventional methods of cutting with special aim to cutting by high-speed abrasive water jet. Basic terms and cutting process are described in theoretical part. Machine used for cutting and single types of the jet or parameters influencing depth and quality of a kerf are described here. Practical usage of this method is also described. Focus in final part of the paper is in single correction systems, as Speed control according to material, Dynamic radius correction and Progressjet system. Practical part is based on creation of four samples from the same material but for each different or no correction system is used. Following quality and work measurement revealed the best quality sample was created by Progressjet.

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	8
Úvod.....	9
1. Nekonvenční metody obrábění	10
1.1 Rozdělení nekonvenčních metod.....	11
2. Technologie vysokorychlostního vodního paprsku	15
2.1 Historie vodního paprsku.....	15
2.2 Obrábění čistým vodním paprskem.....	16
2.3 Obrábění abrazivním vodním paprskem.....	16
2.4 Části stroje	17
2.5 Typy používaných paprsků.....	19
2.6 Kvalita povrchu	20
2.7 Parametry ovlivňující hloubku a kvalitu řezu.....	21
2.8 Možnosti využití vodního paprsku	23
2.9 Korekční systémy	25
3. Praktická část	28
3.1 Materiál vzorku.....	28
3.2. Zkušební vzorky	29
4. Měření	32
4.1 Měření nerovností řezného povrchu	32
4.1.1. Měření nerovností řezných povrchů v horizontálním směru	34
4.1.2. Měření nerovností řezných povrchů ve vertikálním směru	38
4.1.3. Vzhled řezných ploch při použití korekčních systémů	42
4.2 Měření rozměrů	44
4.3 Měření úkosů	46
4.4 Rozbor výsledků	47
Závěr.....	49
Seznam použité literatury	51

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
a	Průměrná horní hodnota [mm]
A	Tažnost [%]
AJM	Abrasive Jet Machining (Obrábění proudem vzduch a abraziva)
UHP	Ultra Hight Pressure (Ultra vysoký tlak)
WJM	Water Jet Machining (Obrábění čistým vodním paprskem)
AWJM	Abrasive Water Jet Machining (Obrábění vodním paprskem s abrazivem)
AWJ	Abrasive Water Jet (Abrazivní vodní paprsek)
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
ASJ	Abrasive Slurry Waterjet (Abrazivní suspenzní paprsek)
b	Průměrná spodní hodnota [mm]
c	Tloušťka materiálu [mm]
CM	Chemical Machining (Chemické Obrábění)
USM	Ultrasonic Machining (Technologie obrábění ultrazvukem)
CNC	Computer Numeric Control (Počítačové číslicové řízení)
EDM	Elektro Discharge Machining (Elektroerozivní obrábění)
CO ₂	Oxid uhličitý
DRC	Dynamic Radius Correction (Dynamická poloměrová korekce)
EBM	Electron Beam Machining (Obrábění elektronovým paprskem)
ECM	Elektrochemical Machining (Elektrochemické obrábění)
IBM	Ion Beam Machining (Obrábění iontovým paprskem)
LBM	Laser Beam Machining (Obrábění paprskem laseru)
MFC	Materiálové řízení rychlosti
NMO	Nekonvenční metody obrábění
PBM	Plasma Beam Machining (Obrábění paprskem plazmy)
PLC	Programmable Logic Controller (Programovatelný logický automat)
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu [μm]
Rm	Pevnost [MPa]
Rp	Mez kluzu [MPa]
Rz	Nejvyšší výška profilu [μm]
SiC	Karbid křemíku
α	Úhel úkosu [°]

Úvod

Nekonvenční metody obrábění jsou dlouhodobě využívány ve strojírenství. Jejich hlavní výhoda spočívá v možnosti obrobit velmi tvrdé či tvarově složité materiály. I když jsou tyto metody užívány již řadu let, stále se pro jejich označení používá pojem nekonvenční. Někteří autoři preferují označení jiná, například fyzikální metody obrábění nebo progresivní metody. V práci však bude operováno s pojmem nekonvenční, jelikož je ve strojírenství více zažitý a všeobecně užívaný.

V posledních letech je v praxi velmi vyhledávanou metodou obrábění abrazivním vodním paprskem. Právě této technice bude věnována hlavní pozornost.

Práce bude rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. V první části budou stručně popsány jednotlivé nekonvenční metody obrábění. Dále bude zaměřena zejména na řezání vodním paprskem, kde se věnuje historii, porovnání dvou základních typů paprsku a podstatným částem řezacího stroje. Pozornost bude rovněž věnována možnostem využití vodního paprsku. Dále kvalitě povrchu a faktorům tuto kvalitu ovlivňujících. V závěru teoretické části bude podrobně popsán význam jednotlivých korekčních systémů použitých na zkušebních vzorcích při experimentech.

Praktická část bude zkoumat vliv korekčních systémů na kvalitu a rozměry povrchu. Konkrétně budou testovány řezné plochy na celkem čtyřech vzorcích vyřezaných ze stejného materiálu pomocí technologie abrazivního vodního paprsku. V práci bude studována kvalita ploch a rozměrová přesnost při použití různých druhů korekčních systémů.

Cílem práce bude zjistit, jak moderní korekční systémy řezných strojů ovlivňují vzhled a kvalitu řezného povrchu a rozměry obrobku. K dosažení cíle budou využívána grafická znázornění nerovností povrchu řezných ploch ve směru kolmém i rovnoběžném vzhledem k ose působícího paprsku, měření vnějších a vnitřních rozměrů obrobků a zjišťování úkosu řezu při použití jednotlivých korekčních systémů.

1. Nekonvenční metody obrábění

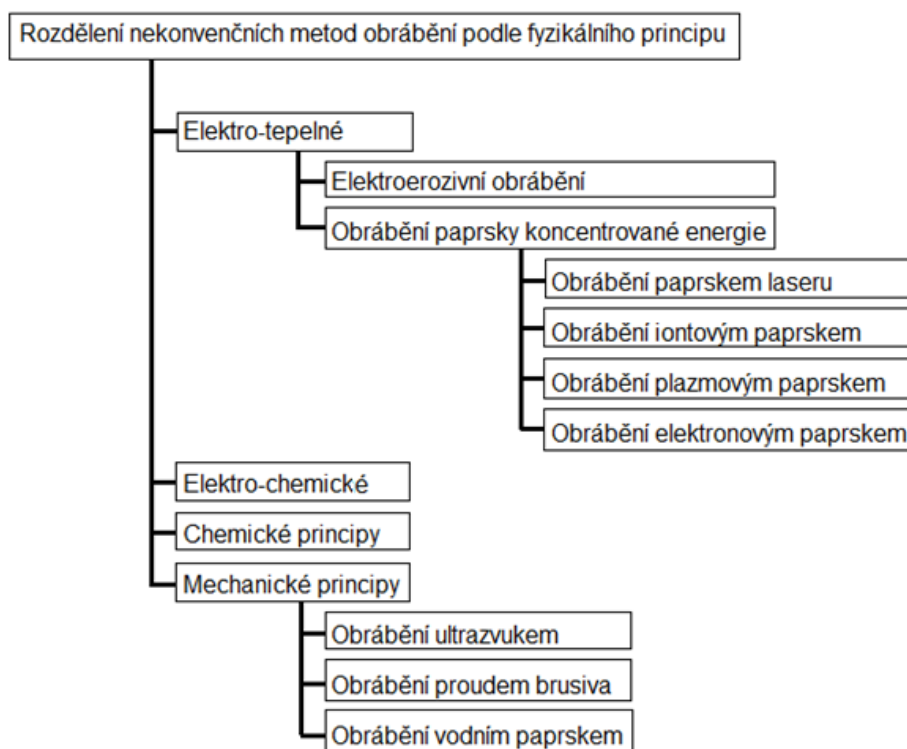
Nekonvenční metody obrábění (NMO) se liší od klasického třískového obrábění zejména tím, že nepoužívají mechanické práce při úběru materiálu. Dalším rozlišovacím znakem konvenčních a nekonvenčních metod je obrobiteľnosť. Zatímco u klasických metod obrábění je obrobiteľnosť limitovaná mechanickými vlastnosťmi materiálu (pevnosť, tvrdosť), u NMO je obrobiteľnosť ovplyvnená predovšetkým fyzikálnymi vlastnosťmi (tepelná vodivosť, elektrická vodivosť, teplota tavenia) a chemickým složením materiálu. Díky tomu se obrábějí i těžko obrobiteľné materiály a tvarově složité výrobky, které nelze zpracovat či vyrobit konvenčním způsobem, nebo by využití konvenčního způsobu bylo ekonomicky nevýhodné. [1], [31], [32]

Píška a kol. [4] jako další rozlišovací znak uvádějí fakt, že při NMO nedochází k přímému kontaktu obráběcího nástroje s materiálem. Ke kontaktu obvykle dochází prostřednictvím paprsku, drátku, nebo elektrody.

Při používání NMO nemusí být materiál obráběcího nástroje tvrdší než obráběný materiál. Tyto metody umožňují provádět složité technologické operace, které nejsou možné s využitím klasických metod. Kocman dále uvádí, že u některých nekonvenčních metod dochází k řízené změně vlastností povrchové vrstvy (zvýšení odolnosti proti korozi či únavové pevnosti). Pro nekonvenční metody se často využívají CNC řídicí systémy. [3]

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod

Každá z metod má své výhody a nevýhody, a lze ji použít pro různé účely či materiály. Podle fyzikální podstaty lze nekonvenční metody obrábění rozdělit do těchto uvedených základních skupin (viz obr. 1.1), které jsou stručně popsány.



Obr.1.1 Rozdělení nekonvenčních metod [1]

Elektroerozivní obrábění (EDM – Elektro Discharge Machining)

Při tomto typu obrábění jsou částičky materiálu odebrány pomocí tepelného a tlakového působení elektrických výbojů v místě obrábění. V místě obrábění vzniká elektrický výboj mezi katodou (nástrojová elektroda) a anodou (obrobek) ponořením do dielektrika (kapalina s vysokým elektrickým odporem např. petrolej, vodní sklo, destilovaná voda). Mezi elektrodami je jiskrová mezera o velikosti 0,01 až 0,5 mm. Rovnoměrně se střídající impulsy, statisticky rozdělené po celé ploše nástroje, jsou základem procesu odebrání materiálu. [1], [2], [4]

Doba přerušení výboje umožní, aby proudící kapalina odplavila všechny vzniklé mikročástice. Čas přerušení výboje však musí být delší, než čas potřebný k deionizaci kapaliny, aby bylo zabráněno vzniku trvalého výboje a nechtěnému úběru materiálu. Z výše uvedeného je jasné, že při používání tohoto typu NMO se mohou obrábět pouze materiály elektricky vodivé. Díky tomu, že při tomto způsobu obrábění se dosahuje přesnosti až 0,001 mm, lze touto metodou nahradit broušení tam, kde je to technologicky nemožné. [1], [4]

Nejčastěji se tato metoda užívá při výrobě forem pro lití, forem pro zápustky, nebo střížnic do střížných nástrojů. [4]

Obrábění paprskem laseru (LBM - Laser Beam Machining)

Při obrábění paprskem laseru se materiál ubírá účinkem silného paprsku monochromatického světla, který se soustředí na velmi malou plochu. V místě, kde dopadá, se mění energie světelného záření na energii tepelnou a dochází k natavení a vypařování materiálu. Rozhodujícími parametry záření jsou vlnová délka, intenzita, režim ozařování a také absorpční a tepelné vlastnosti ozařovaného kovu. [5], [6]

Laserové metody obrábění se používají především pro svařování a dělení materiálu, vrtání, gravírování a značení. [4]

Obrábění iontovým paprskem (IBM – Ion Beam Machining)

Proces obrábění iontovým paprskem probíhá ve vakuu, kde nabité atomy (ionty) bombardují povrch obrobku pomocí urychlovacího napětí. Zdrojem těchto iontů bývají inertní plyny a to argon, krypton nebo xenon. Při dopadu iontů na obrobek dochází k uvolnění atomů z obrobku v důsledku pružné srážky. Tomuto jevu se říká iontové rozprašování. Intenzita úběru závisí na proudové hustotě, energii dopadajících iontů (300 - 500 eV), na poměru hmotnosti iontů a atomů materiálu, a také na úhlu dopadu. Při této metodě nevzniká teplo a nedochází k mechanické deformaci povrchové vrstvy. [1], [2]

Technologie se využívá na vytváření matric při výrobě integrovaných obvodů a při čištění a hlazení povrchu. [7]

Obrábění plazmovým paprskem (PBM – Plasma Beam Machining)

U této metody je obráběný materiál postupně odtavován a odpařován paprskem plazmy, který vychází z hořáku vysokou rychlostí. Plazmu lze definovat jako směs pozitivně nabitých iontů a neutrálních atomů, která má vysokou teplotu (10 000 až 30 000 °C). Vytváří se rozkladem molekul plynu při průchodu elektrickým obloukem, který hoří mezi dvěma elektrodami - katodou (nejčastěji wolframová elektroda) a anodou (řezaný materiál). Mezi používané plyny patří argon, vodík, dusík, vzduch a jejich směsi.

Plazma se nejčastěji používá pro řezání různých materiálů (včetně těžkoobrobitelných ocelí), svařování a navařování, nanášení povlaků, tavení materiálů v peci apod. [1]

Obrábění elektronovým paprskem (EBM – Electron Beam Machining)

Obrábění elektronovým paprskem je metoda, využívající kinetickou energii urychlených elektronů, která se při srážce s materiálem přemění na jinou formu energie, nejčastěji tepelnou. Takto vytvořená tepelná energie je pak schopna odpařit materiál v místě, kde paprsek dopadá. Celý proces probíhá ve vakuu. [2]

Obrobitelnost pomocí EBM není závislá na mechanických vlastnostech materiálu, proto je využití této metody široké. Lze opracovávat kovové i nekovové materiály; žárupevné oceli, austenitické oceli, slitiny zinku, titanové a hliníkové slitiny. [1], [4]

Elektro-chemické technologie obrábění (ECM – Electrochemical Machining)

Podstatou této metody je působení elektrického proudu na elektrolyt. Tento jev se nazývá elektrolýza a její teoretické zdůvodnění zapsal v roce 1834 Michael Faraday. [7] Při tomto typu obrábění je mezi nástrojem a obrobkem mezera o velikosti 0,025 až 1,3 milimetru a prostor mezi nimi je trvale zaplněn elektrolytem. [1] Elektrolytem bývají roztoky kyselin (kyselina sírová nebo fosforečná), nebo alkalické roztoky (chlorid sodný, dusičnan sodný apod.). [8] V případě této metody je obrobek anoda a nástroj katoda. Tvar katody odpovídá tvaru konečného výrobku. K největšímu úběru materiálu dochází v místě, kde jsou nejmenší vzdálenosti katody a anody (kde je největší hustota elektrického pole). [6]

ECM se používá pro materiály, které by nebylo možné obrobit standardními metodami. Jedná se například o obrábění tvrdých materiálů, jako jsou kalená ocel, žárupevné slitiny, tvarované plochy a hluboké díry. [3]

Chemické technologie obrábění (CM – Chemical Machining)

CM je proces leptání kovových materiálů postupným rozpouštěním vrstev o tloušťce od několika setin milimetrů do několika milimetrů. [1] Řízené odleptávání je založeno na chemické reakci mezi obráběným materiálem a reaktivním prostředím, nejčastěji kyselinou, nebo hydroxidem. [5] Místa, která mají být nepoškozená, se chrání speciálním povlakem, tzv. maskou. Masky jsou vyrobené z materiálů odolných proti chemické reakci, jako jsou guma a plasty. [1], [2]

V praxi se uplatňuje při úběru malých tlouštěk materiálu z obrobků velkých rozměru a složitých tvarů, dále pro přesné modelování tvarových součástek, odstraňování tenkých vrstev v malosériové výrobě, chemické leptání elektronických součástek a další. [2], [5]

Obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic Machining)

Princip obrábění za pomoci ultrazvuku je založen na mechanickém působení abrazivních zrn, která svými účinky odebírají materiál obrobku. Vzniklé mikro a makro trhliny vytvoří mechanicky oslabenou vrstvu, která se působením brusných zrn snadno odstraní. Ultrazvukové obrábění se tedy skládá z křehkého narušení povrchových vrstev materiálu a odstranění částeczek pomocí cirkulace brusných zrn. [7] Brusná zrna (elektrokorund, karbid boru, karbid křemíku) spolu s kapalinou (voda, petrolej, olej) jsou přiváděna do pracovního prostoru pod nástroj, který kmitá s frekvencí 20 až 30 KHz. Kmitající nástroj porušuje materiál a brusný prostředek odděluje z materiálu třísky. [6], [7]

Ultrazvukem lze obrábět křehké a tvrdé materiály (sklo, keramika, křemík, grafit, kompozity, slinuté karbidy apod.). Není však vhodný pro měkké materiály vzhledem k tomu, že při použití této metody v nich ulpívají abraziva. [4]

Obrábění proudem vzduchu a abraziva (AJM - Abrasive Jet Machining)

Při tomto obrábění dochází k mechanickému úběru materiálu pomocí nárazu vzduchu vysokou rychlostí na obráběný materiál. Proud vzduchu je obohacen o brusné částice. Abraziva, která se používají pro tuto metodu, jsou oxid hlinitý (Al_2O_3) nebo karbid křemíku (SiC). Díky dobrému chladicímu účinku vzduchu je teplotní zatížení velmi malé a na obrobek nepůsobí téměř žádné síly. Proces je však poměrně pomalý. [7], [8]

Používá se například k obrábění těžkoobrobitelných a křehkých materiálů, vyřezávání a vrtání mělkých otvorů a tvarů na malých plochách, odstraňování otřepů a ojehtování. [1]

2. Technologie vysokorychlostního vodního paprsku

Technologii řezání vodním paprskem lze rozdělit na dvě hlavní metody. První z nich je řezání čistým vodním paprskem a druhým typem je řezání abrazivním vodním paprskem, kde proud vody urychluje abrazivní částice. Obě technologie mají své místo ve výrobním procesu. Před tím, než si podrobněji rozebereme obě technologie, bude krátce zmíněna historie vodního paprsku. [9], [33]

2.1 Historie vodního paprsku

Člověk využíval energii proudu vody ve svůj prospěch od pradávna. Jednou z prvních aplikací vodního proudu bylo jeho využití při těžbě nerostů, zejména zlata. Ve 30. letech dvacátého století se tzv. hydromonitorů (vodních děl) využívalo při těžbě uhlí v Rusku. V roce 1936 Peter Tupitsyn použil vodní proud k těžbě uhlí také na Ukrajině.

V 50. a 60. letech potřeba těžit uran obnovila myšlenku používání vodního proudu při těžbě, protože užití této metody redukuje rizika, jež jsou s těžbou uranu spojena (zejména radiace). V padesátých letech prováděl první pokusy s ultravysokým tlakem vody k řezání dřeva a dalších materiálů Dr. Norman Franz (ultra vysoký tlak je definován jako tlak větší než 30 000 liber na čtvereční palec). Dnes je použití paprsku mnohem širší, nicméně Dr. Franz tímto dokázal, že vodní paprsek může být využit i pro účely řezání. Jelikož byl prokazatelně prvním experimentátorem se soudobým typem vodního paprsku pro řezání materiálů, je považován za otce vysokorychlostního vodního paprsku.

V 70. letech 20. století se objevilo první zařízení pro řezání abrazivním vodním paprskem. Běžný paprsek se smísil s abrazivními částicemi a škála řezatelných materiálů se značně rozšířila. To zcela změnilo způsob uvažování o řezání vodním paprskem. Jedním z nejvýznamnějších badatelů, kteří se zasadili o rozvoj abrazivního vodního paprsku, byl Dr. Mohamed Hashish z firmy Flow v USA. Intenzivně zkoumal vlastnosti abrazivního vodního paprsku zejména v 70. a 80. letech minulého století. Problematikou kapalinových proudů se však zabývá dodnes. [10]

V 90. letech se začalo vodním a abrazivním vodním paprskům věnovat mnoho vědeckých a vývojových pracovišť po celém světě. Na přelomu století se pak značně rozšířilo využití paprsků v mnoha nových oborech lidské činnosti (nejen řezání, ale také čištění, odstraňování povrchových vrstev, příprava povrchů před sanací betonových konstrukcí, obrábění, úprava ploch, mletí částic, využití v lékařství atd.). [28]

Z českých vědců se o výzkum a rozvoj technologie vodního paprsku už v 80. letech 20. století nejvíce zasloužil prof. Jaroslav Vašek z Hornického ústavu ČSAV v Ostravě. Toto pracoviště (v současnosti Ústav geoniky AV ČR) dodnes patří mezi světově uznávaná centra výzkumu kapalinových paprsků. [29]

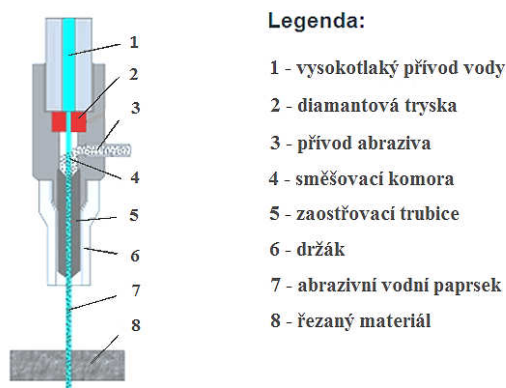
2.2 Obrábění čistým vodním paprskem (WJM - Water Jet Machining)

Řezání (obrábění) čistým vodním paprskem je možné díky mechanickému účinku, který vzniká při dopadu vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na malou plochu materiálu. Proud vody s vysokým tlakem prochází přes trysku o průměru 0,075 - 0,25 mm. Paprsek vniká do obrobku a postupně ztrácí energii. Pro vodní paprsek v materiálu je typický pohyb po zaoblené dráze, kde se poloměr mění s délkou oblouku. [2]

Vodní paprsek je velmi přesný. Průměr proudu vody může být menší než 0,1 mm a umožňuje řezání jemných kontur, ostrých úhlů a malých poloměrů. Obvyklý průměr paprsku pro průmyslové použití je okolo 0,3 mm. Touto metodou lze řezat zejména měkké materiály včetně výrobků z papíru, těsnících materiálů, plastů, pěn, textilu a potravin. [11]

2.3 Obrábění abrazivním vodním paprskem (AWJM – Abrasive Water Jet Machining)

Abrazivní vodní paprsek byl vyvinut z důvodu nedostatečné schopnosti čistého vodního paprsku řezat tvrdší materiály. Ukázalo se, že paprsek, který obsahuje abraziva má stokrát až tisíckrát větší účinnost než paprsek čistý. Je to dáno tím, že zde vodní proud pouze urychluje částice a ty pak provádí, díky erozivnímu účinku, samotný proces řezání. Na obrázku 2.1 lze vidět schéma abrazivní hlavy pro AWJ řezání. [2]



Obr. 2.1 Schéma hlavy pro řezání abrazivním vodním paprskem [12]

2.4 Části stroje

Stroj pro abrazivní vodní řezání se skládá z několika částí. Základní části stroje jsou popsány níže.

Zdroj vysokotlaké kapaliny

Používají se dva druhy zařízení vytvářející vysokotlaký vodní paprsek. Firma Flow systems prosazuje na trhu zařízení s multiplikátorem a japonští výrobci z firmy Sugino Machine vyrábějí zařízení s triplexovým plunžrem. [13]

1. Triplexové plunžrové čerpadlo má konstrukci podobnou čerpadlu pístovému. Místo pístu se v systému nachází dlouhý plunžr. Při pohybu pístu zpět se díky sacímu účinku otevře ventil a kapalina proudí do válce. Při pohybu zpět se uzavírá sací ventil a otevírá výtlačný ventil. Vzniklé pulzace se redukují tím, že kapalina je nasávána postupně do tří válců. Kapalina z čerpadla směřuje vysokotlakým potrubím do řezací hlavy. [13]
2. Do multiplikátoru je přiváděn olej pomocí ventilu. Ten střídavě přivádí olej před i za píst, který je spojen se dvěma pístnicemi na stranách. O tom, jaké bude výsledné zesílení tlaku, rozhoduje poměr velikosti průměru velkého pístu a průměru obou pístnic. [6]

Akumulátor tlaku

Vysokotlaká nádoba slouží k tlumení rázů vzniklých v multiplikátoru. Při vysokých tlacích (až 400 MPa) je totiž voda stlačitelná až o 25%. Nádoba navíc využívá tzv. autofretáž, což je nárazové přetlakování za účelem zpevnění. Tím je zamezeno vzniku mikro a makrotrhlin, které by pulzace ve vysokotlakém systému mohly způsobit. Akumulátor tak udržuje stejný tlak a stálou rychlost proudění vody. [2], [4]

Vysokotlaké vedení

Vyrábí se z vysoce pevné korozi-vzdorné oceli. Požaduje se odolnost proti vysokým tlakům a rázům, těsnost jednotlivých spojů a také bezpečnost a spolehlivost. Potrubí musí být částečně flexibilní, aby umožnilo pohyb řezné hlavy. Všechny komponenty pro dopravu vysokotlaké kapaliny jsou normalizovány a standardizovány. [2], [13]

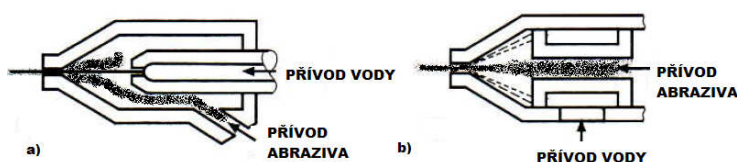
Alternativu k vysokotlakému potrubí představují ohebné vysokotlaké hadice speciálně konstruované tak, aby vydržely tlak vedené kapaliny. [35]

Abrazivní tryska

Přivedení abraziva do proudu přineslo mnoho problémů. Největším problémem je samotné přivedení abraziva do proudu vody tak, aby došlo k minimálnímu narušení. Rozlišujeme dvě hlavní technologie abrazivního paprsku z hlediska konstrukčního provedení trysky. [2], [13]

1) Systém s přímým přívodem abraziva (AWJ - Abrasive Water Jet)

Zrna abraziva jsou do směšovací komory přiváděna ze zásobníku. V komoře jsou paprskem vody strhávány a urychlovány. U AWJ se rozlišují dvě hlavní možnosti vstupu abraziva do směšovací komory a to radiální nebo axiální (obr. 2.2). [1], [2]



Obr. 2.2 Trysky pro AWJ [2]

- a) trysky s radiálním přísuvem abraziva
- b) trysky s axiálním přísuvem abraziva

2) Systém s přímým vstřikováním abraziva (ASJ - Abrasive Slurry Waterjet)

Stlačená suspenze abraziva s vodou v tlakové nádobě se přivádí do speciální trysky. Používané tlaky jsou do 100 MPa s průtokem v řádu několika $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$. [1]

Při porovnání těchto metod bylo zjištěno že ASJ má ve srovnání s AWJ vyšší účinnost a vyšší proudovou hustotu narážejících částic. Systém také umožňuje použití užšího paprsku. Výhodou AWJ je naopak možnost použití mnohem vyšších tlaků vody (v současnosti až 700 MPa) a tím zvýšení energie paprsku, což se pozitivně projeví při jeho aplikaci (zvětšení tloušťky řezaných materiálů, možnost řezání tvrdších materiálů apod.). [2], [35]

Lapač energie paprsku

Jedná se o nádobu s vodou, která zachycuje zbytkovou energii vodního paprsku potom, co projde skrz materiál. Také slouží k zachycení třísek a tlumení hluku. Tlumení hluku je důležité, protože při AWJ obrábění může dosahovat až 105 dB. Také je nezbytné, aby hloubka nádoby byla dostatečná a došlo k zachycení energie paprsku dřív, než dosáhne dna nádoby (běžně 300 – 600 mm). [2]

2.5 Typy používaných paprsků

Paprsky lze rozdělit podle mnoha kritérií (např. podle použité kapaliny, podle velikosti tlaku, podle přítomnosti abraziva apod.). V následující části bude použito rozdělení podle způsobu generování paprsku. [35]

Kontinuální paprsek

Kontinuální paprsek se vyznačuje stálou energetickou hodnotou v průběhu řezání. Na povrch materiálu dopadá ve dvou fázích. V první fázi se vytváří nárazový tlak, který se později v další fázi mění na stagnační. Stagnační tlak však může být až o řád nižší, než nárazový. Jedná se o nejpoužívanější metodu při řezání. [13]

Pulzující paprsek

Rozdělením kontinuálního paprsku na shluky vody vzniká po dopadu paprsku na povrch materiálu cyklický nárazový tlak, čímž se účinnost paprsku výrazně zvyšuje. Používají se tři druhy pulzujících vodních paprsků: [13]

- jednotlivé pulsy nebo pulsy s nízkou frekvencí.
- přerušovaný
- modulovaný

Tímto typem paprsků se v České republice zabývá Ústav geoniky AV ČR. Jejich odborníci vyvinuli novou metodu generování pulzujícího paprsku pomocí akustických vln. Působením akustických vln je možné vytvořit paprsek pulzující s frekvencí až desítky tisíc pulsů za sekundu. [14]

Kavitační vodní proud

Jedná se také o kontinuální paprsek obsahující kavitační bubliny. Vlivem destrukčních sil těchto kavitačních bublin po nárazu dochází k porušení materiálu. Přestože má tento proces lepší erozivní účinky, než čistý paprsek, je použití v praxi malé vzhledem ke složitosti trysky. [13]

Kryogenní vodní paprsek

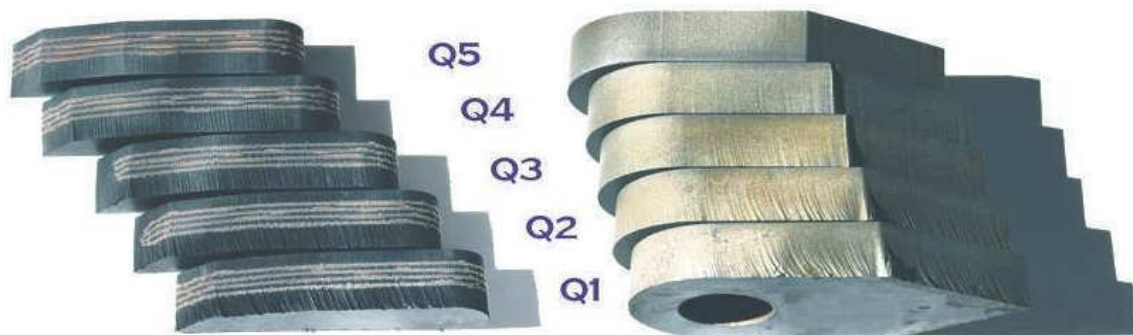
Čistý vodní paprsek může mít lepší řezné schopnosti, pokud jsou do paprsku přidány krystalky ledu ve tvaru kuliček. Ledové kuličky jsou vyráběné z vody, nebo ze stlačeného CO₂. Jedná se vlastně o variantu AWJ, kde jako abrazivo slouží led či CO₂. Uvažuje se o využití kryogenního proudu v potravinářství a medicíně při řezání kostí. [7]

2.6 Kvalita povrchu

Kvalita povrchu po řezání je velmi důležitá v možnosti využití vodního paprsku. Firmy často volí vodní paprsek z důvodu vysoké kvality řezu, bez potřeby další úpravy. Samozřejmě jsou tam i ty, které potřebují nižší kvalitu. Ta může být snadno dosažena zvýšením, nebo snížením rychlosti. Z tabulky 2.1 je patrné, že kvalita je rozdělena do pěti skupin označených Q1-Q5, kde plochy nejhorší kvality jsou označeny Q1 a naopak plochy s nejvyšší kvalitou jsou zařazeny pod Q5. Pro lepší představu lze jednotlivé stupně kvality vidět na obrázku 2.3. [27]

Tab. 2.1 Označení kvality řezu po řezání AWJ

Kvalita	Slovní zhodnocení
Q1	Obrobek byl s vysokou rychlostí posuvu jen zhruba rozřezán. Může být vyžadována určitá další síla pro oddělení obrobku. Dochází k výrazným nepřesnostem na řezu.
Q2	Obrobek byl jen hrubě rozřezán. Vzhledem k mírnému snížení rychlosti posuvu je materiál vždy rozřezán.
Q3	Nabízí poměrně dobrou kvalitu s ekonomickou rychlostí posuvu
Q4	Kvalita řezu se vyznačuje vysokou přesností obrobku a také nízkou drsností povrchu.
Q5	Nejvyšší kvalita, nejvyšší přesnost obrobku a nejnižší drsnost povrchu. Obrobky jsou řezány s velmi nízkou rychlostí posuvu.



Obr. 2.3 Kvalita řezné plochy po řezání AWJ [15]

2.7 Parametry ovlivňující hloubku a kvalitu řezu

Tato část práce se zaměřuje na faktory, kterými lze ovlivnit hloubku řezu a s tím související kvalitu povrchu. V praktické části bude zjišťováno, jak kvalitu řezu mohou ovlivnit korekční systémy. Mezi parametry ovlivňující hloubku a kvalitu řezu patří tlak vody, průměr vodní trysky, rychlost posuvu trysky nad materiálem, vzdálenost trysky od materiálu, délka a průměr zaostřovací trubice, úhel sklonu paprsku, hmotnostní průtok abraziva, typ použitého abraziva a jeho zrnitost. Pokud se provádí několikanásobný řez po stejné trajektorii, lze mezi parametry zařadit také počet průchodů paprsku.

Tlak vody

Při zvýšení tlaku vody se dosáhne větší hloubky řezu. Potom lze zvýšit řeznou rychlost, nebo redukovat spotřebu abraziv. Potřebný tlak vody je pro každý materiál jiný, přičemž závisí na mechanických a fyzikálních vlastnostech materiálu, a rovněž na dalších částech stroje. [16]

Průměr vodní trysky

Průměr vodní trysky má velký vliv na množství spotřebované kapaliny. Změnou průměru vodní trysky se mění průtok kapaliny a tím i celková energie paprsku. Čím vyšší je energie paprsku, tím větší je i hloubka řezu. Zvětšením průměru trysky se dosáhne větší hloubky řezu, pouze však do určité hodnoty. [13]

Abraziva

Při AWJ řezání jsou abraziva hlavní řeznou složkou. Parametry abraziv mají výrazný vliv na celkový proces řezání. Jsou to druh materiálu (hustota, tvrdost a pevnost), tvar a velikost abraziva, a také je patrný vliv hmotnostního toku abraziva. Při výběru nejvhodnějšího abraziva závisí kromě technologických požadavků na kvalitu a výkon také na jeho ceně a citlivosti k životnímu prostředí. [13], [16]

Rychlost posuvu

Čím déle působí vodní paprsek na konkrétní místo, tím bude hlubší řezání, protože proud má dostatek času erodovat materiál. Při zvýšené rychlosti se proces urychlí, ale dochází k výraznému zhoršení kvality povrchu děleného materiálu. [13]

Vzdálenost trysky od materiálu

Vzdálenost trysky od materiálu má vliv na rozšiřování paprsku. S rostoucí vzdáleností se paprsek rozšiřuje a dochází k obohacení paprsku vzduchem. Při velkých vzdálenostech tak paprsek může vyvolávat jen deformaci materiálu, nebo jeho únavové poškození. Při malé vzdálenosti trysky od materiálu má proud vysokou kinetickou energii a dochází k rozrušení materiálu nejen v ose, ale částečně i v radiálním směru. [13]

Z technologického hlediska je proto nejvýhodnější co nejkratší vzdálenost. Při průmyslovém řezání se obvykle dodržuje vzdálenost 4 mm, která je dostačující i v případě drobných nerovností řezaného materiálu při řezání velkých obrobků. S touto vzdáleností počítají také naklápěcí korekční systémy, které odstraňují některé nežádoucí vlivy paprsku na rozměry a kvalitu obrobku. [35]

Úhel sklonu paprsku

Nejčastěji probíhá řezání materiálu pod úhlem 90° . Vodní paprsek dopadá kolmo na povrch materiálu. Vzhledem k vlastnostem paprsku a jeho kinematice se však ukazuje, že větší hloubky řezu a vyšší kvality obrobené plochy se dosáhne právě správnou změnou úhlu. Tento fakt využívají moderní korekční systémy, které vhodným naklápěním řezné hlavy zvyšují výslednou kvalitu řezné plochy. [16]

Počet průchodů paprsku

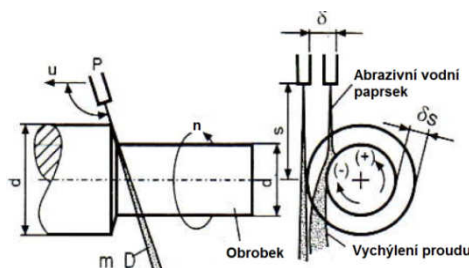
Zvýšením počtu průchodů po stejné řezné dráze lze dosáhnout větší hloubky řezu. Stejného výsledku se tak dosáhne i při nízkém tlaku nebo při vyšší řezné rychlosti. Každý další přejezd nástroje vytváří menší přírůstek hloubky řezu. Je to způsobeno odporem na stěnách materiálu a zároveň dochází ke zhoršení odvodu kapaliny. Kvalita řezné plochy se však opakovanými průchody podstatně snižuje. [13]

2.8 Možnosti využití vodního paprsku

Kromě tradičního použití vodního paprsku na dělení materiálu můžeme provádět i operace jako je soustružení, vrtání, frézování a gravírování. [2]

Soustružení

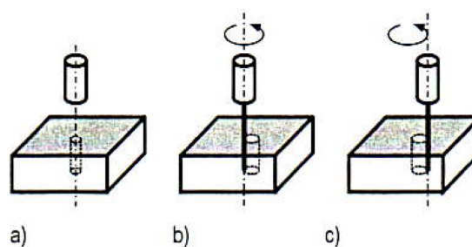
Obrábění probíhá při rotaci materiálu a abrazivní vodní paprsek se pohybuje ve směru osy. Úběr materiálu je způsoben radiálním přísuvem do požadované hloubky. Základní schéma soustružení je uvedeno na obrázku 2.4. Kvalita plochy po obrobení je závislá na rychlosti posuvu, tlaku paprsku, velikosti a smyslu otáček, hloubce řezu a také typu, tvaru a velikosti abraziva. Při soustružení se obvykle využívá několikanásobného průchodu paprsku, přičemž každý další je posunut k ose obrobku o hodnotu přísuvu. [2], [13]



Obr. 2.4 Soustružení pomocí AWJ [2], [34]

Vrtání

Používá se převážně k vrtání těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou sklo, keramika, niklové slitiny na plynové turbíny. Existuje několik základních způsobů vzájemného pohybu vodního proudu a obrobku (obr. 2.5).

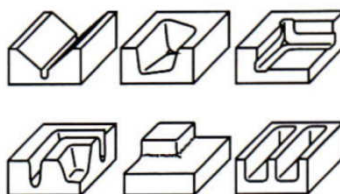


Obr. 2.5 Metody vrtání pomocí AWJ

a) převrtávání, b) vyřezávání, c) frézování otvorů. [2]

Frézování

Využívá se pro tvarově složité obrobky, jak ukazuje obrázek 2.6. Při frézování pracuje vodní paprsek stejně jako u dělení materiálů, s tím rozdílem, že nedochází k prořezání materiálu. Proud vícenásobně přechází po obrobené ploše a postupně vytváří požadovaný tvar blížící tvaru konečného výrobku. Vhodnou aplikací pro tuto metodu obrábění je výroba tvářecích nástrojů, ale také může být použita v kamenosochařství k opracování a leštění mramoru, žuly či v interiérové a exteriérové architektuře. Tato technologie navazuje na techniku gravírování využívanou v reklamní nebo umělecké činnosti. [17]



Obr. 2.6 Příklady frézování pomocí AWJ [2]

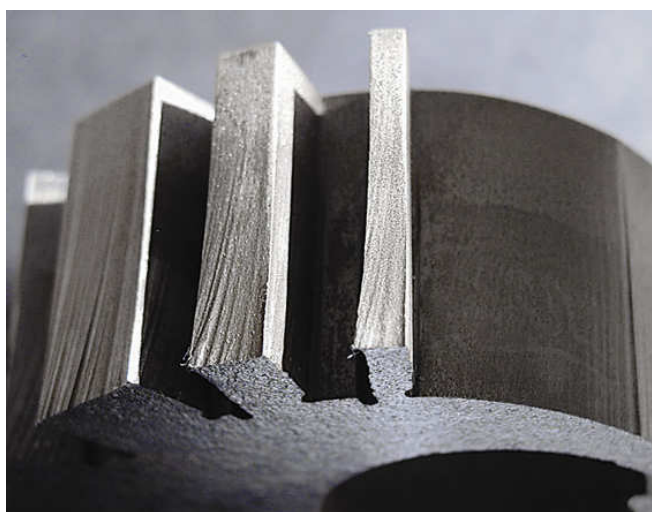
Gravírování

Princip je podobný předcházející metodě. Vodním paprskem je do materiálu vytvářen výsledný reliéf, po kterém se mohou pouze dobrousit některé detaily. Technologie AWJ se začíná při gravírování stále více využívat, protože umožňuje obrábět téměř všechny druhy materiálu. Lze tedy gravírovat sklo, minerály, keramiku, ale i materiály hořlavé, či citlivé na teplo. Určitou nevýhodou je případný vliv vlhkého prostředí. [18]

2.9 Korekční systémy

Praktická část práce se bude zabývat vlivem moderních korekčních systémů na kvalitu a rozměry povrchu obrobku, je tedy potřeba říct si něco o těchto systémech a jejich fungování. Úkolem korekčních systémů je zamezit nerovnostem řezného povrchu, ke kterým dochází vlivem kinematiky paprsku při řezání materiálu. Tím dojde k eliminaci podřezů v místech výstupu paprsku z materiálu při změně směru řezání (obr. 2.7), k odstranění případného úkosu či soudkovitosti řezné plochy a ke zvýšení kvality plochy a přesnosti řezání. Důsledkem má být rovněž zkrácení celkového času na řezání obrobku.

Korekční systémy v současné době implementují do svých vysokotlakých řezacích systémů téměř všichni výrobci. Pro účely této práce byl k dispozici korekční systém výrobce vysokotlakých zařízení – firmy PTV s.r.o. z Hostovic. Ta ve svých zařízeních využívá celkem tří korekčních systémů, jejichž hlavní funkce jsou popsány dále. [35]



Obr. 2.7 Ukázka vzniku nežádoucích podřezů [20]

Materiálové řízení rychlosti (MFC)

Materiálové řízení rychlosti se snaží nahradit zpomalování a zrychlení tak, aby se zabránilo zášlehům, podřezům, vymletinám apod. Algoritmus je stále vyvíjen a současné výsledky by měly být dobré. Systém funguje tak, že se rychlost pohybu paprsku dostane na hodnotu, kdy je řezná spára stejně široká nahoře i dole. Na této rychlosti se udrží po dráze, která souvisí s tloušťkou materiálu, a poté se rychlost zvyšuje. Pokud se začne přibližovat k záhybu nebo konci trajektorie, zpomalí se. Při zpomalení se rychlost paprsku chvíli drží na snížené rychlosti, aby se paprsek stihl srovnat do přímého směru. Vhodnou rychlost určí algoritmus z předpokládaného chování paprsku. Cílem je dosáhnout toho, aby paprsek neopustil řeznou trajektorii o víc, než je určeno.

Dynamická poloměrová korekce (DRC – Dynamic Radius Correction).

Další kompenzace zlepšující kvalitu řezu je funkce DRC. Při řezu dochází v závislosti na rychlosti nejen k zúžení a zpoždění paprsku na výstupu z materiálu, ale také ke změně šířky spáry na vstupu do materiálu. Na základě výsledků testů se systém snaží kompenzovat změnu šířky spáry. Při tom vychází z toho, že je korekce na průměr paprsku nastavená uživatelem na základě testovacího řezu, který určí maximální průměr paprsku. Od tohoto maxima za pohybu systém odčítá odhadnutou hodnotu změny průměru.

Tato funkce je implementována experimentálně a stále se vylepšuje. Dosavadní výsledky jednotlivých pokusů ukazují, že větší význam této korekce je při řezání tenčích materiálů, kdy je rozdíl mezi nejširší a nejužší spárou největší.

Progressjet

Progressjet je systém, který je schopný eliminovat technologické chyby na řezu způsobené AWJ řezáním. Jedná se o vykompenzování úkosu vznikajícího při úbytku energie abrazivního vodního paprsku naklápěním řezné hlavy (obr. 2.8). U běžných materiálů (konstrukční ocel, nerezová ocel, slitiny hliníku, titan, mosaz, měď) je možné při zapnutí funkce Progressjet dosáhnout kompenzaci úkosu 0,05 mm (avšak pouze do tloušťky materiálu 60 mm). Určité riziko však hrozí při vyšších rychlostech řezání. S rostoucí rychlostí jsou totiž kompenzační pohyby při změnách rychlosti a směru silnější a mohly by překročit dynamické vlastnosti stroje. [19]

Podle firmy PTV má systém Progressjet následující vlastnosti: [20]

- *eliminuje chyby vzniklé energetickým úbytkem paprsku*
- *umožňuje realizovat kolmé výřezy a zároveň zvyšuje tvarovou přesnost výrobku*
- *vhodná pouze pro plošné aplikace řezání*
- *funkci zajišťuje přídatná 3D mechanika stolu řízená systémem CNC stolu na základě materiálové a technologické databáze*
- *umožňuje naklápění rotačních os v rozsahu $\pm 10^\circ$*
- *jeho funkce je plně řízena systémem CNC stolu*
- *nevyžaduje specializovaný 3D CAD-CAM“*



Obr. 2.8 Řezání s funkcí Progressjet

3. Praktická část

V rámci praktické části bakalářské práce byl experimentálně zkoumán vliv moderních korekčních systémů při řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Pro tyto účely byly vytvořeny 4 vzorky ze stejného materiálu. První vzorek byl vyroben (vyřezán abrazivním vodním paprskem) bez použití jakéhokoliv korekčního systému. Každý další vzorek byl vyroben za použití jiného korekčního systému. U vzorků byla posuzována jak kvalita plochy, tak také rozměrová přesnost.

3.1 Materiál vzorku

Pro výrobu vzorků byl použit materiál AISI 316 Ti o tloušťce 10 mm. Jedná se o austenitickou, kyselinovzdornou chromniklmolybdenovou ocel, která je stabilizována přísadou titanu. Díky molybdenu má vyšší odolnost proti kyselinám a zabraňuje vzniku rizika hluboké místní koroze. Titan způsobuje, že pro svařování silnějších rozměrů není zapotřebí žádná tepelná úprava, nicméně právě kvůli použití titanu tuto ocel nelze vyleštit do vysokého lesku.

Tento druh oceli je vhodný pro konstrukční díly, přístroje a aparáty chemického průmyslu. Osvědčuje se v takových průmyslových odvětvích jako fotografický a farmaceutický. Zařízení pro výrobu a pracování buničiny, textilu a barviv, hnojiv, plastů a pohonných hmot jsou často vyrobená z této oceli. V níže uvedených tabulkách (3.1 a 3.2) je materiál blíže specifikován jeho chemickým složením a mechanickými vlastnostmi. [36]

Tab. 3.1 Chemické složení [21]

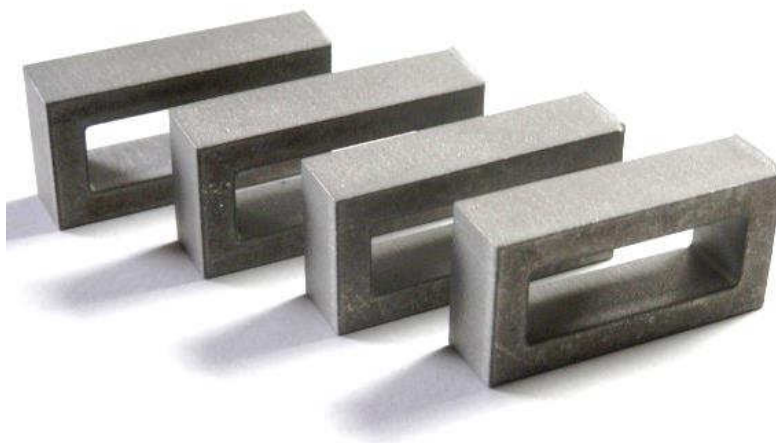
Prvek	C max	Cr	Ni	Mo	Si max	Mn max	P max	S max	Ti
Hodnota [%]	0,08	16 -18	11 -13	2 ± 3	1	2	0,045	0,03	0,40

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti [22]

Vlastnost	Pevnost	Mez kluzu		Tažnost
	Rm (MPa)	Rp 0,2 (MPa)	Rp 0,1 (MPa)	A 50 [%]
Hodnota	540-690	240	270	40

3.2. Zkušební vzorky

Pro účely sledování, jak kvalitu povrchu a rozměry ovlivňují korekční systémy, byly vytvořeny čtyři vzorky. Vzorek č. 1 byl vyřezán bez jakýchkoliv korekčních systémů. U vzorku č. 2 došlo k zapnutí funkce materiálové řízení rychlosti (MFC), která se snaží o zlepšení povrchu řezu dynamickým zrychlováním a zpomalováním rychlosti paprsku. Zvýšená rychlost s sebou přináší zúžení řezné spáry a to má za následek vznik soudkovitosti na obrobku. Pro odstranění tohoto jevu byla u vzorku č. 3 zapnuta navíc dynamická poloměrová korekce (DRC). U vzorku č. 4 se pak k předchozím korekčním systémům připojil systém naklápění řezací hlavy (Progressjet). Tvar všech vzorků byl shodný a lze jej vidět na obrázku obr. 3.1.



Obr. 3.1 Použité vzorky v experimentu

Nastavení parametrů AWJ při řezání jednotlivých vzorků bylo shodné u všech vzorků. Hodnoty ukazuje následující tabulka 3.3.

Tab. 3.3 Nastavení parametrů AWJ při řezání vzorků

Nastavení stroje při řezání vzorků	
Tlak vody [MPa]	400
Rychlost řezání [mm.min ⁻¹]	134,3
Průměr vodní trysky [mm]	0,33
Průměr zaostřovací trubice [mm]	0,89
Délka zaostřovací trubice [mm]	76
Vzdálenost od materiálu [mm]	4
Úhel řezání [°]	90
Druh abraziva	Australský granát
Zrnitost abraziva [MESH]	80

Samotné provedení experimentu proběhlo v Ústavu Geoniky AV ČR. Vzorky byly vytvořeny pomocí hydroabrazivního řezání na zařízení firmy PTV s.r.o. Konkrétně se jedná o řezací stůl CNC WJ2020B-1Z-D (viz. obr 3.2) a vysokotlaké čerpadlo JETS (viz obr. 3.3). Bližší informace o těchto zařízeních jsou uvedeny v tabulkách 3.4 a 3.5.



Obr. 3.2 Řezací stůl CNC WJ2020B-1Z-D od firmy PTV [23]



Obr. 3.3 Čerpadlo PTV – JETS [23]

Tab. 3.4 Parametry řezacího stolu: CNC WJ2020B-1Z-D

Parametry řezacího stolu: CNC WJ2020B-1Z-D	
Pracovní rozsah	
Osa x [mm]	2000
Osa y [mm]	2000
Osa z [mm]	300
Maximální posuvová rychlost [m·min ⁻¹]	75
Rozlišení nastavení os stroje x,y,z [mm]	0.001
Přesnost nastaví polohy [mm]	0.03
Rozměry stroje	
Délka [mm]	2500
Šířka [mm]	2500
Výška [mm]	2250
Hmotnost [kg]	5000

Tab. 3.5 Parametry čerpadla PTV – JETS

Parametry čerpadla PTV – JETS	
Multiplikátor model H2O	2 kusy
Množství řezací vody [l·min ⁻¹]	7,5
Elektromotor	Siemens
Hydraulické čerpadlo	MOOG, dvojité
Řízení	PLC
Počet tlakových úrovní	10, přepínatelné (9 tlaků + 0)
Max. hmotnost [kg]	2 000
Max. hloubka [mm]	1 430
Max. šířka [mm]	1 890
Max. výška [mm]	1 720
Min. tlak vstupní vody [bar]	3,5
Max. tlak vstupní vody [bar]	6
Ph řezací vody	6-8
Náplň hydraulického oleje [l]	200 l
Typ hydraulického oleje	HM 46
Maximální tlak [MPa]	417

4. Měření

Na čtyřech ocelových vzorcích bylo provedeno několik druhů měření. Byly zjišťovány nerovnosti řezného povrchu, rozměrová přesnost obrobku a měřen úkos. Všechna měření se týkala nejdelší strany vzniklého obrobku (vzorku). Z těchto měření pak bylo možné vytvořit závěry, jakým způsobem může použití různých druhů korekčních systému ovlivnit kvalitu řezu.

4.1 Měření nerovností řezného povrchu

První z měření bylo provedeno v prostorách Ústavu geoniky AV ČR na optickém profilometru MicroProf FRT (viz obr. 4.1). Tento přístroj může měřit studovaný povrch jak podél vybrané linie povrchu (profil), tak také na vybrané ploše (měření 3D topografie povrchu). [24]



Obr. 4.1 Optický profilometr MicroProf FRT

Použitý profilometr se skládá ze dvou hlavních částí: nosné konstrukce a měřicí hlavy, obsahující senzor. Parametry jednotlivých částí jsou uvedeny v tabulkách 4.1 a 4.2.

Tab. 4.1 Měřicí hlava a senzor SEN 000 03

Charakteristika měřicí hlavy a sensoru SEN 000 03	
Spektrální rozsah osa z [mm]	3
Pracovní vzdálenost [mm]	22,5
Vertikální rozlišení [nm]	100/30
Přesnost [μm]	1
Lineratia [%]	0,1
Velikost bodu paprsku [μm]	12
Laterální rozlišení [μm]	6

Tab. 4.2 Pracovní parametry profilometru MicroProf FRT

Pracovní rozsah	
Osa x [mm]	200
Osa y [mm]	200
Osa z [mm]	50
Maximální měřicí rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	100
Minimální měřicí rychlost [$\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	1
Rozlišení nastavení os měřicího přístroje x,y,z [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,001
Přesnost nastavení polohy [mm]	$\pm 0,001$
Minimální vzdálenost mezi měřicími body $\Delta X, \Delta Y$ [μm]	0,6
Maximální rozměr měřeného vzorku [mm^3]	310 x 310 x 50
Maximální hmotnost vzorku [kg]	5
Hmotnost přístroje [kg]	520
Doporučená pracovní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	20 ± 2
Maximální dovolená změna teploty v laboratoři [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$]	0,5

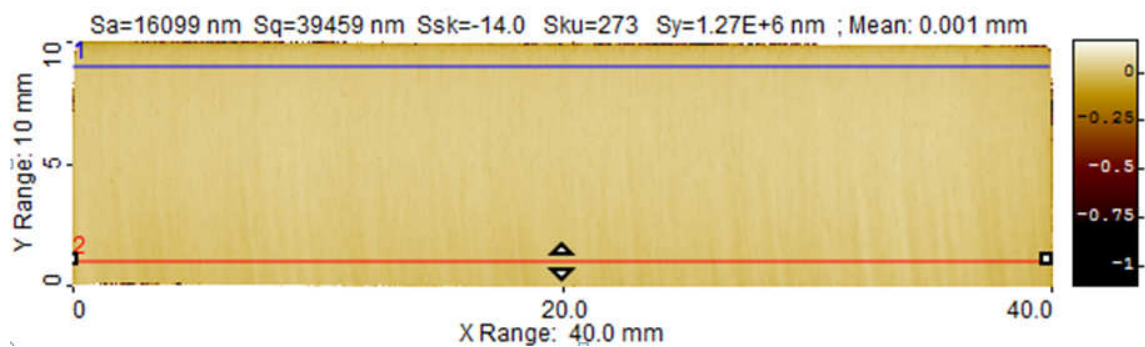
Samotné měření nerovností povrchu každého vzorku (řezného povrchu) bylo provedeno v horizontálním i vertikálním směru vzhledem k působení paprsku. V horizontálním směru probíhalo měření ve dvou liniích – horní a dolní. Obě linie jsou situovány vždy 1 mm od hrany obrobku (viz obr. 4.2). Z obrázků 4.2 a 4.3 je patrné, že profil povrchu získaný měřením v horní linii je vyznačen červeně, dolní profil pak modře. Ve vertikálním směru jsou linie tři, přičemž jejich barevné označení (v pořadí zleva) je následující: modrá, zelená, červená. Vzdálenost mezi jednotlivými liniemi je 20 mm, dvě jsou umístěny blízko hran obrobku, jedna uprostřed plochy (viz např. obr. 4.10). Získané profily povrchu jsou opět odlišeny podle míst měření.

Mimo to byla na každém z daných vzorků (ploch) profilometrem změřena plocha o rozměrech 8x10 mm (obr. 4.18 až 4.21). Výhodou plošného měření je, že jeho výsledky je možné znázornit jako 3D rekonstrukci původního povrchu, kdy je měření lépe vizuálně představitelné.

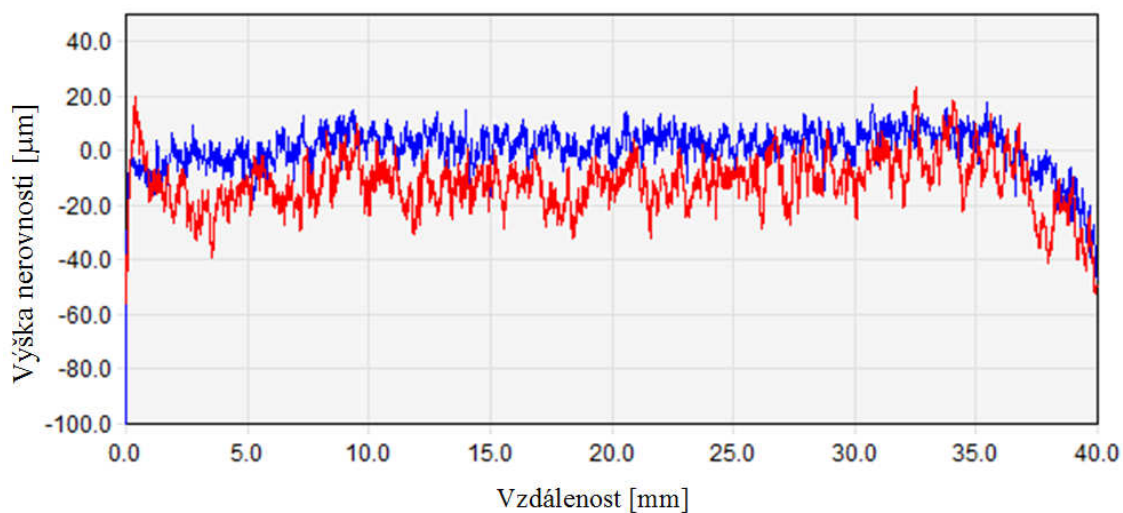
Konkrétní výsledky měření jsou v další části uvedeny v grafické podobě. Pro každý vzorek byl uveden vždy povrch s označenými liniemi měření profilu povrchu a příslušné profily v horizontálním a vertikálním směru. Dále uvádím také 3D rekonstrukce povrchů. Konkrétní výsledky měření budou uvedeny v grafické podobě (obr. 4.22).

4.1.1. Měření nerovností řezných povrchů v horizontálním směru

Vzorek č. 1 (bez korekčních systémů)



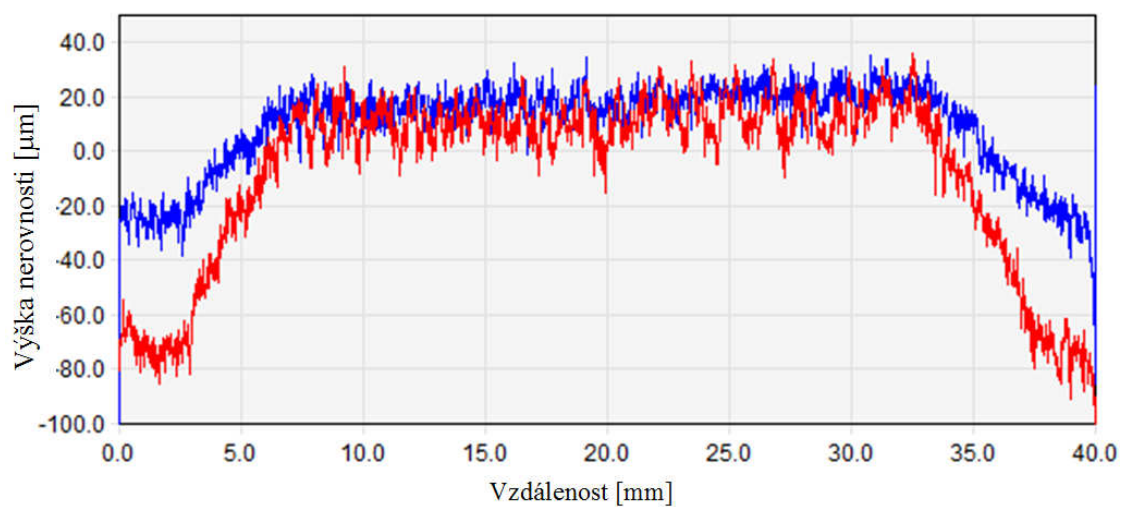
Obr. 4.2 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 1. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



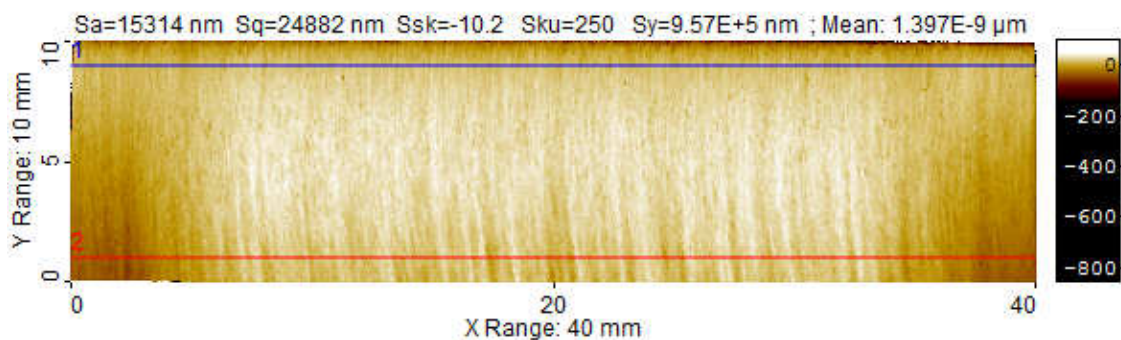
Obr. 4.3 Profily nerovností řezného povrchu v horizontálním směru pro vzorek č. 1. Profily barevně odlišeny podle míst měření

Vzorek č. 2 (materiálové řízení rychlosti)

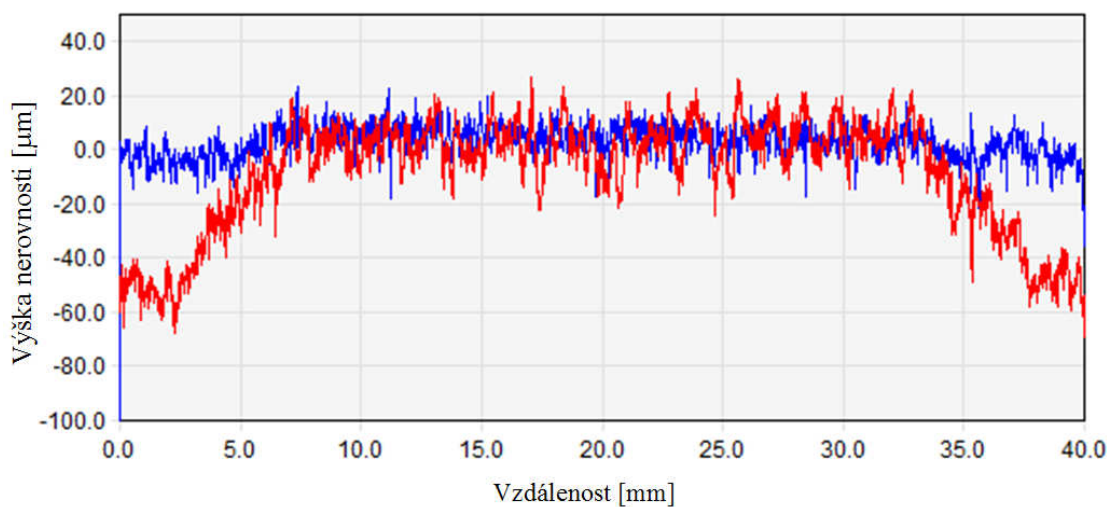
Obr. 4.4 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 2. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



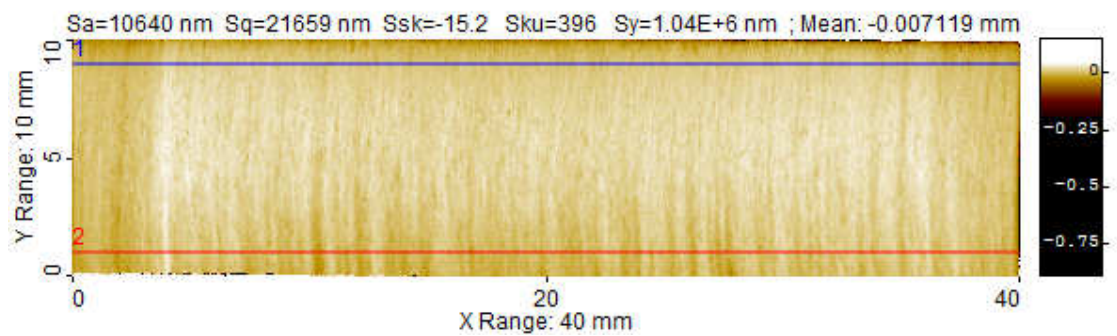
Obr. 4.5 Profily nerovností řezného povrchu v horizontálním směru pro vzorek č. 2. Profily barevně odlišeny podle míst měření

Vzorek č. 3 (předchozí + dynamická poloměrová korekce)

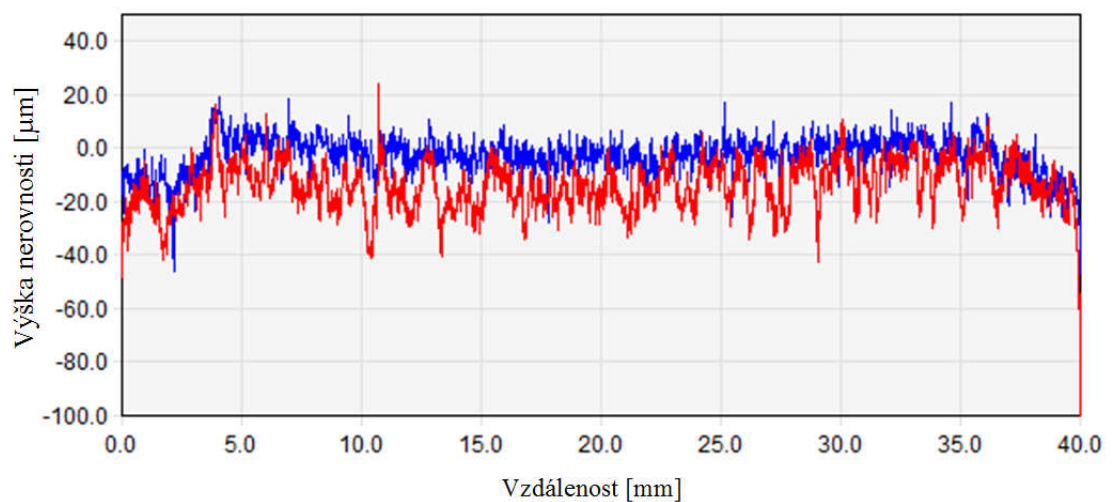
Obr. 4.6 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 3. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



Obr. 4.7 Profily nerovností řezného povrchu v horizontálním směru pro vzorek č. 3. Profily barevně odlišeny podle míst měření

Vzorek č. 4 (předchozí + Progressjet)

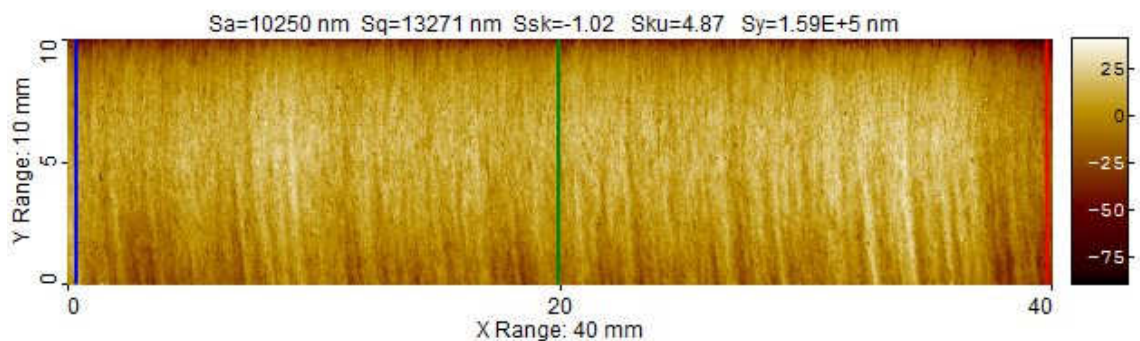
Obr. 4.8 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 4. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



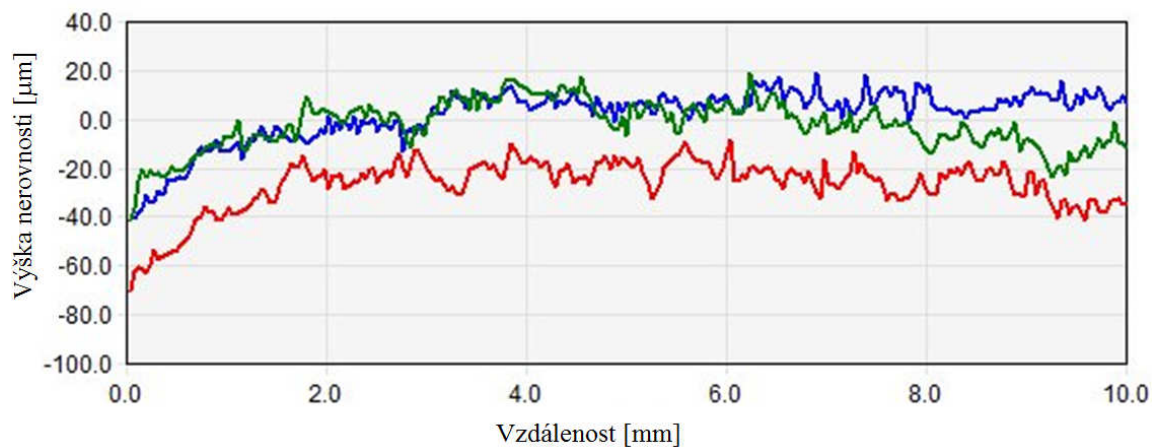
Obr. 4.9 Profily nerovností řezného povrchu v horizontálním směru pro vzorek č. 4. Profily barevně odlišeny podle míst měření

4.1.2. Měření nerovností řezných povrchů ve vertikálním směru

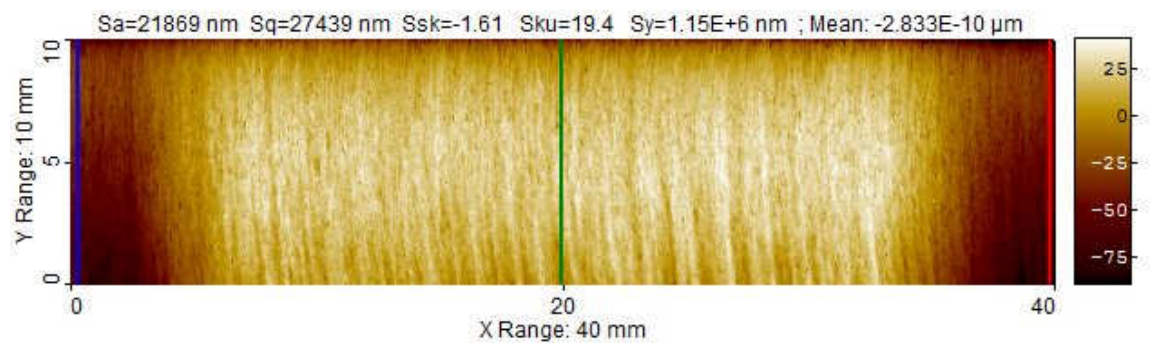
Vzorek č. 1 (bez korekčních systémů)



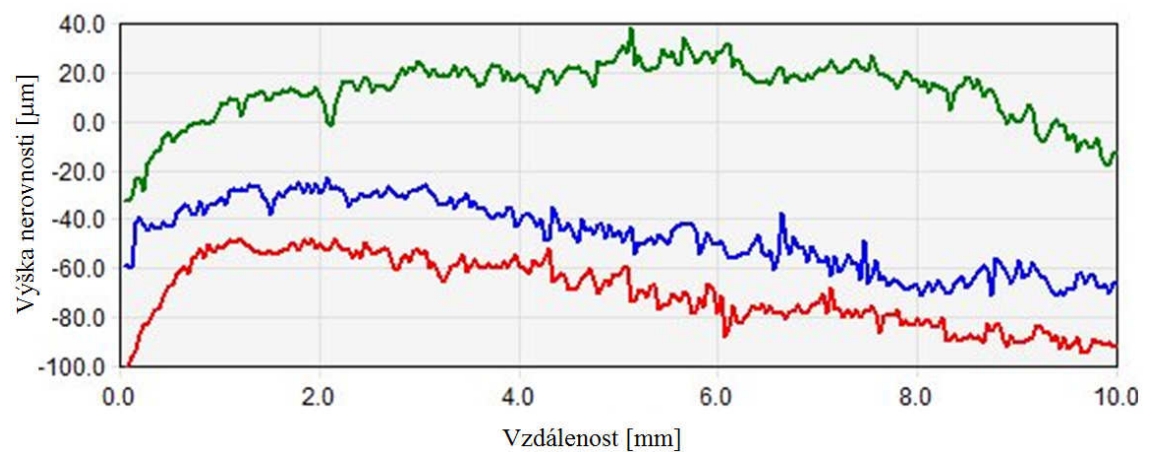
Obr. 4.10 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 1. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



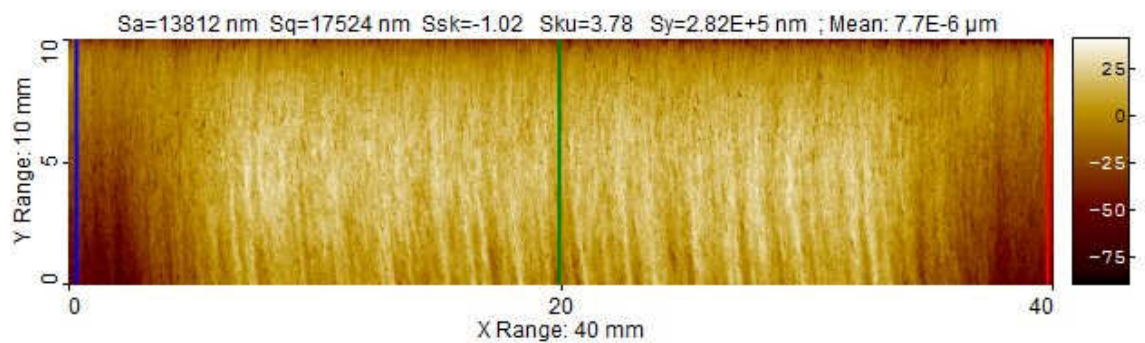
Obr. 4.11 Profily nerovností řezného povrchu ve vertikálním směru pro vzorek č. 1. Profily barevně odlišeny podle míst měření

Vzorek č. 2 (materiálové řízení rychlosti)

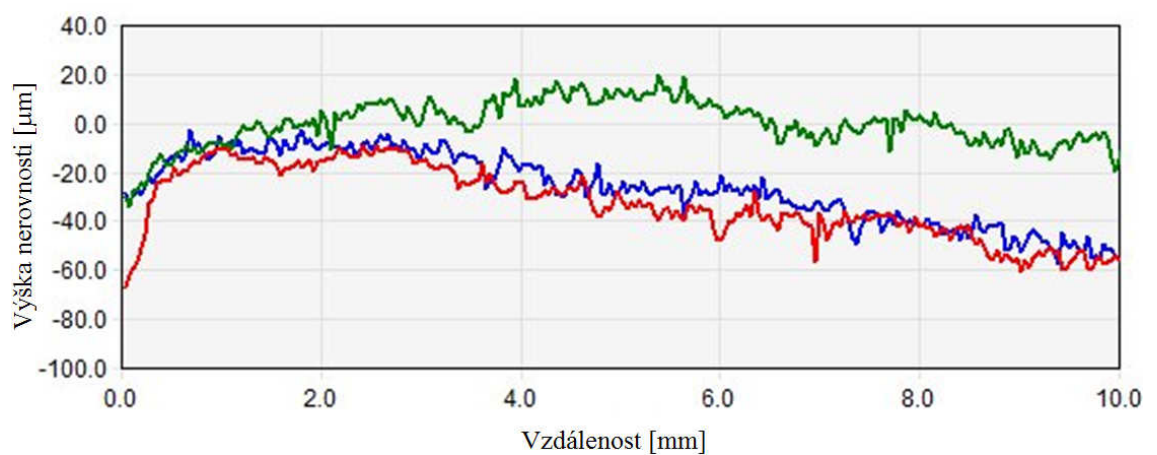
Obr. 4.12 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 2. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



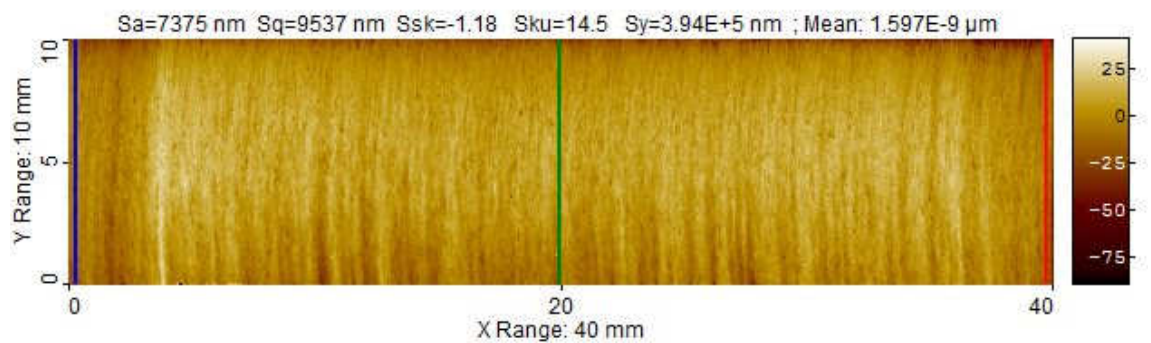
Obr. 4.13 Profily nerovností řezného povrchu ve vertikálním směru pro vzorek č. 2. Profily barevně odlišeny podle míst měření

Vzorek č. 3 (předchozí + dynamická poloměrová korekce)

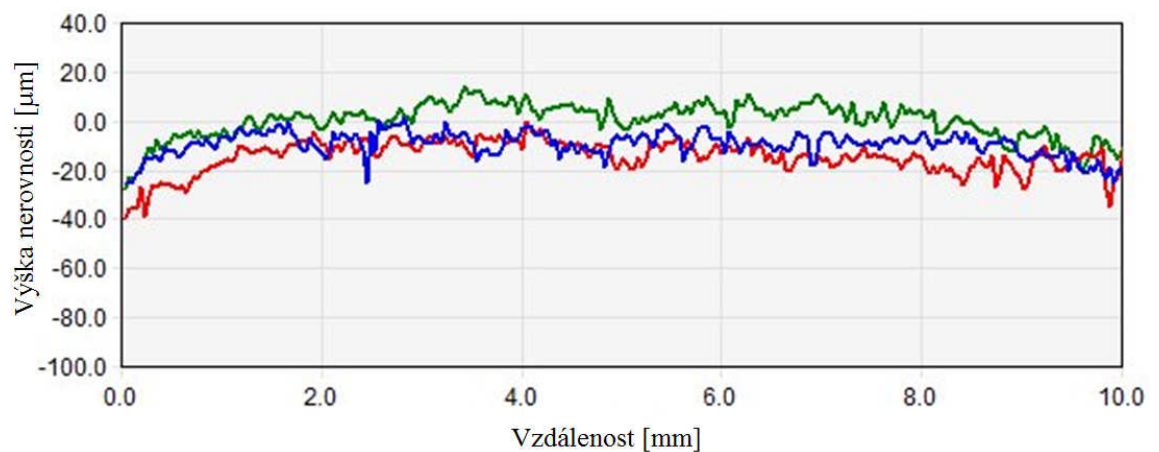
Obr. 4.14 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 3. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



Obr. 4.15 Profily nerovností řezného povrchu ve vertikálním směru pro vzorek č. 3. Profily barevně odlišeny podle míst měření

Vzorek č. 4 (předchozí + Progressjet)

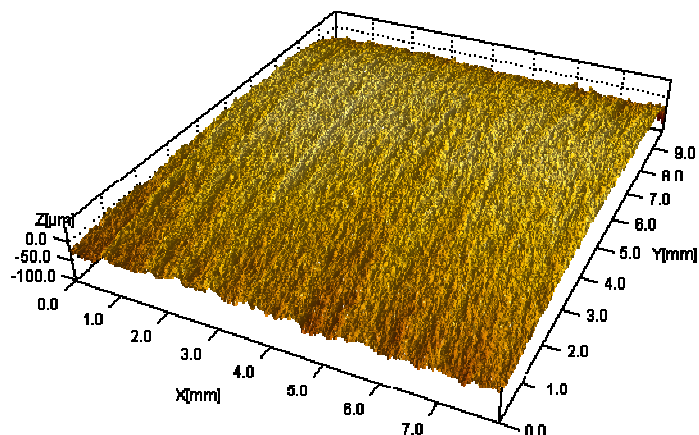
Obr. 4.16 Rekonstrukce řezného povrchu u vzorku č. 4. Vyznačena místa měření nerovností povrchu



Obr. 4.17 Profily nerovností řezného povrchu ve vertikálním směru pro vzorek č. 4. Profily barevně odlišeny podle míst měření

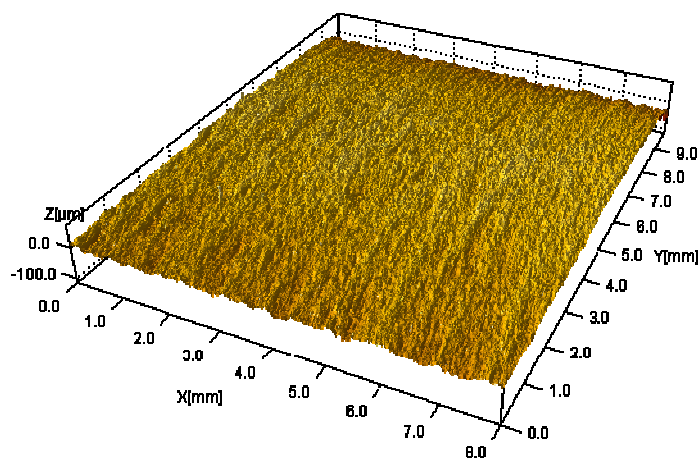
4.1.3. Vzhled řezných ploch při použití korekčních systémů

Vzorek č.1 (bez korekčních systémů)

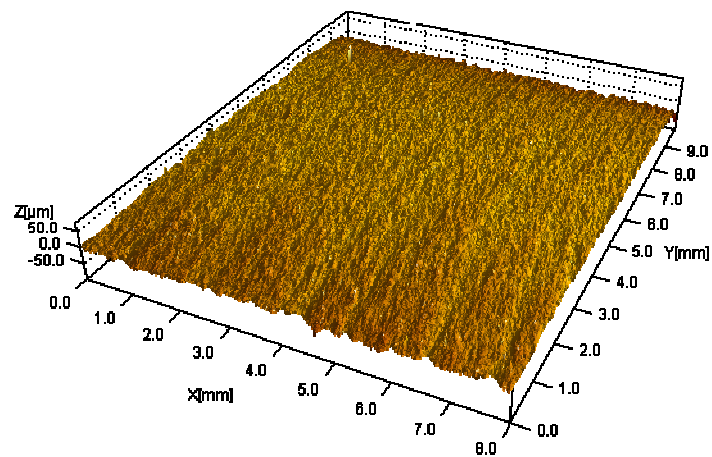


Obr. 4.18 Vzhled řezné plochy u vzorku bez použití korekčních systémů

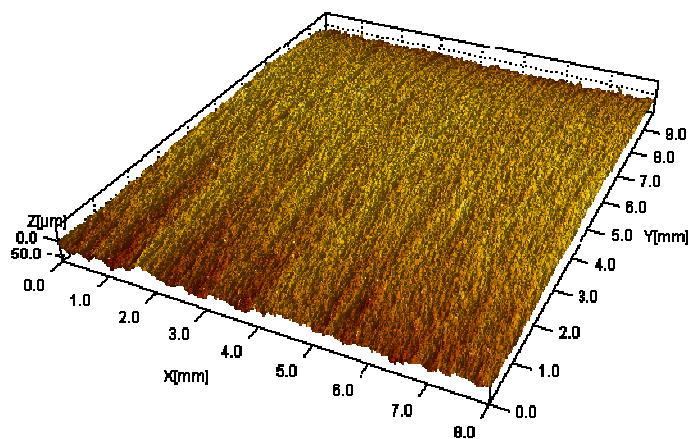
Vzorek č. 2 (materiálové řízení rychlosti)



Obr. 4.19 Vzhled řezné plochy u vzorku s použitím materiálového řízení rychlosti

Vzorek č. 3 (předchozí + dynamická poloměrová korekce)

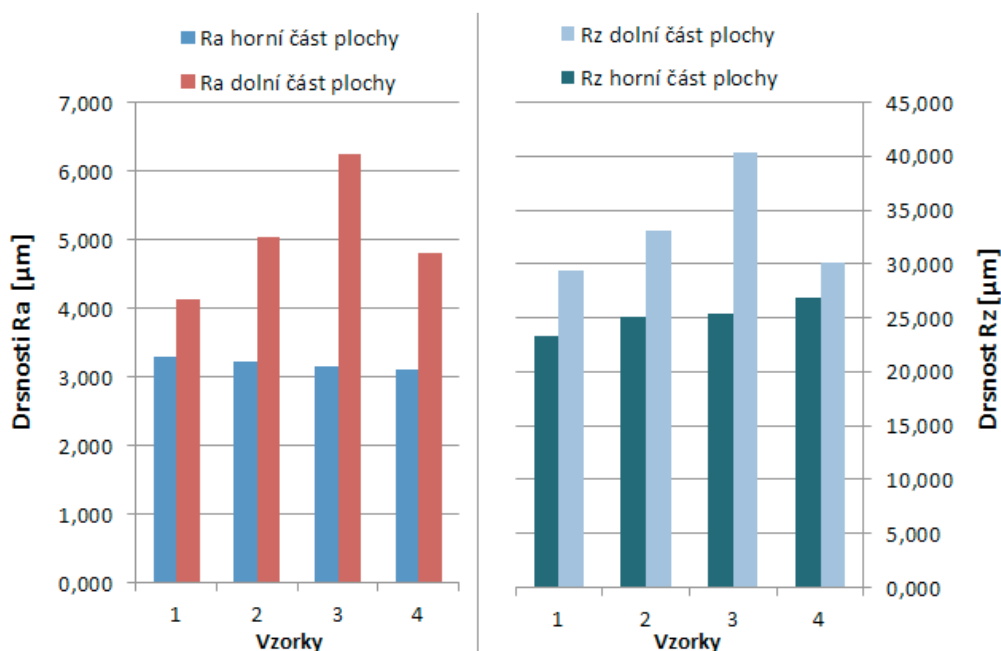
Obr. 4.20 Vzhled řezné plochy u vzorku s použitím materiálového řízení rychlosti a dynamické poloměrové korekce

Vzorek č. 4 (předchozí + Progressjet)

Obr. 4.21 Vzhled řezné plochy u vzorku s použitím materiálového řízení rychlosti, dynamické poloměrové korekce a Progressjet

Měření drsnosti ploch

V grafu na obr. 4.22 jsou pro jednotlivé řezné povrchy uvedeny hodnoty drsností R_a (průměrná aritmetická úchylka profilu) a R_z (nejvyšší výška profilu) u profilu v horní části plochy (v místě vstupu paprsku do materiálu) a profilu ve spodní části plochy (místo, kde paprsek materiál opouští). Linie, kde byly drsnosti měřeny, ukazuje např. obr. 4.2.



Obr. 4.22 Drsnosti R_a a R_z stanovené v horní a dolní části jednotlivých řezných ploch

4.2 Měření rozměrů

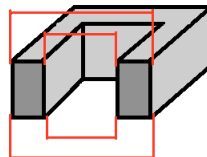
Při řezání vznikají rozměrové nepřesnosti, úkosity a boule, které jsou důležitým ukazatelem kvality výsledného produktu. Následující strany experimentální části této práce se budou zabývat právě rozměrovou přesností.

Měřicí zařízení

Pro srovnání rozměrové přesnosti jednotlivých vzorků bylo použito digitální posuvné měřidlo značky POWERFIX s rozsahem měření do 150 mm a přesností 0,01 mm.

Byly měřeny zvlášť vnější a vnitřní rozměry daného obrobku (obr. 3.1) v horní a dolní části (obr. 4.23). Na vnější straně, která má 40 mm, bylo provedeno 10 měření. Vzdálenost mezi jednotlivými měřeními byla vždy stejná, tedy 4 mm. U vnitřní strany proběhlo měření analogicky na 10 místech. Vzhledem k tomu, že tato strana má rozměr pouhých 30 mm, byl rozsah mezi jednotlivými měřeními pouhé 3 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny

v tabulkách 4.3 a 4.4. V první tabulce jsou hodnoty vnějších rozměrů obrobku, v druhé vnitřní. Tabulky jsou doplněny výpočty průměrných rozměrů pro jednotlivé vzorky. Tyto údaje poslouží ke zjištění průměrného úkosu.



Obr. 4.23 Znárodnění míst kde byl vzorek měřen

Tab. 4.3 Vnější naměřené rozměry vzorků (hodnoty jsou uvedeny v milimetrech)

	Vzorek č. 1		Vzorek č. 2		Vzorek č. 3		Vzorek č. 4	
	nahoře	dole	nahoře	dole	nahoře	dole	nahoře	dole
1	19,98	20,33	19,94	20,19	19,72	20,01	19,76	19,78
2	19,99	20,33	19,96	20,24	19,72	20,08	19,80	19,81
3	20,00	20,33	19,97	20,34	19,72	20,11	19,81	19,81
4	20,01	20,34	19,98	20,34	19,73	20,10	19,81	19,80
5	20,01	20,34	19,99	20,34	19,73	20,10	19,81	19,80
6	20,01	20,34	19,99	20,34	19,73	20,09	19,81	19,80
7	20,00	20,34	19,99	20,34	19,73	20,09	19,80	19,80
8	19,99	20,34	19,98	20,34	19,73	20,08	19,80	19,80
9	19,99	20,34	19,94	20,31	19,72	20,07	19,80	19,80
10	19,98	20,33	19,90	20,14	19,71	19,97	19,76	19,76
Průměr	20,00	20,34	19,96	20,29	19,72	20,07	19,80	19,80

Tab. 4.4 Vnitřní naměřené rozměry vzorků (hodnoty jsou uvedeny v milimetrech)

Měření	Vzorek č. 1		Vzorek č. 2		Vzorek č. 3		Vzorek č. 4	
	nahoře	dole	nahoře	dole	nahoře	dole	nahoře	dole
1	10,00	9,58	10,02	9,82	10,20	9,99	10,26	10,25
2	9,98	9,58	10,02	9,74	10,20	9,92	10,23	10,22
3	9,98	9,56	10,02	9,68	10,20	9,88	10,24	10,26
4	9,98	9,55	10,02	9,58	10,20	9,86	10,24	10,24
5	10,00	9,63	10,02	9,60	10,20	9,86	10,26	10,25
6	10,00	9,65	10,02	9,60	10,19	9,84	10,26	10,26
7	10,00	9,65	10,02	9,58	10,20	9,84	10,26	10,26
8	10,00	9,63	10,02	9,58	10,21	9,86	10,27	10,27
9	10,00	9,63	10,01	9,72	10,21	9,91	10,30	10,31
10	9,98	9,61	10,01	9,81	10,21	10,00	10,32	10,32
Průměr	9,99	9,61	10,02	9,67	10,20	9,90	10,26	10,26

4.3 Měření úkosů

Při řezání abrazivním vodním paprskem mohou vzniknout různé úkosy, dosahují však maximální hodnoty $1,5^\circ$. Mohou nastat případy, kdy se řezná drážka ve spodní části obrobku zvětšuje, nebo zmenšuje (paprsek nabývá kuželovitého tvaru). Optimální varianta nastává, když paprsek zůstává konstantní po celou dobu průchodu materiálem. Při práci bylo zjišťováno, jaký je vliv korekčních systémů na úkos. [25]

Pomocí funkce tangens byl vypočten průměrný úkos na jednotlivých vzorcích díky tomu, že byl z předchozích tabulek (4.3 a 4.4) znám rozdíl dvou průměrných hodnot (horní, spodní) a hodnota tloušťky materiálu (10,15 mm). Při výpočtu úkosu bylo postupováno podle níže uvedeného vzorce. Pro lepší představu byl vytvořen náčrtek (obr. 4.24). Hodnoty úkosů pro jednotlivé vzorky na vnější straně jsou zaznamenány v tabulce 4.5. Úkosy byly změřeny také na vnitřní straně a vypočítané hodnoty nám ukazuje tabulka 4.6.

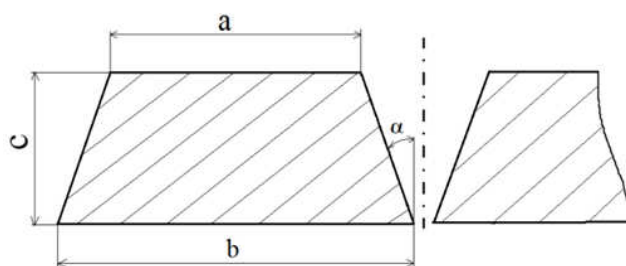
a - průměrná horní hodnota [mm]

b - průměrná spodní hodnota [mm]

c - tloušťka materiálu [mm]

α - úhel úkosu $[\circ]$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\left| \frac{a - b}{2} \right|}{c}$$



Obr 4.24 Náčrtek měření úkosů u jednotlivých vzorků

Tab. 4.5 Úkosy vzorků pro vnější rozměr

Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4
$0^\circ 57' 34''$	$0^\circ 55' 32''$	$0^\circ 59' 32''$	0°

Tab. 4.6 Úkosy vzorků pro vnitřní rozměr

Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4
1° 4' 20''	0° 59' 15''	0° 50' 48''	0°

4.4 Rozbor výsledků

Pokud se blíže podíváme na měření nerovností ploch v horizontální linii, pak lze vidět následující výsledky. Nerovnosti povrchu u vzorku číslo 1 (tedy bez zapnutých korekcí) jsou relativně konstantní po celé délce řezu v horní i spodní části řezné plochy (viz obr. 4.3). Ve spodní části je drsnost větší v důsledku úbytku energie paprsku po průchodu materiálem (viz obr. 4.22). Z obr. 4.18 pak lze vyčíst, že ve spodní části se paprsek „ohýbá“ proti směru pohybu trysky. Dosažený úkos řezné spáry je necelý 1° (viz tab. 4.5). Ve spodní části vzorku (obrobku) jsou patrné podřezy v důsledku ohybu a ztráty energie paprsku.

Po aplikaci korekce *Materiálové řízení rychlosti* dochází na začátku a na konci řezu ke zpomalení posuvu paprsku, aby se paprsek v rozích srovnal do přímého směru. Tato korekce byla použita při obrábění vzorku č. 2. Korekce sice sníží podřezání a nerovnosti ve spodní části řezné plochy v místech změny směru paprsku, dojde však k vytvoření „soudkovité“ plochy (viz obr. 4.5). Paprsek totiž na začátku a na konci pohybu působí na materiál delší dobu, než uprostřed pohybu a má tedy dostatek času odebrat více materiálu. Drsnost povrchu zejména ve spodní části se nepatrně zvýšila, dosažený průměrný úkos řezné spáry zhruba odpovídal úkosu jako u vzorku č. 1. Podřezy ve spodní části vzorku byly odstraněny.

Následně byla zapnuta také *Dynamická poloměrová korekce* (vzorek č. 3). Ta má za úkol eliminovat soudkovitost povrchu tím, že na začátku a na konci pohybu oddálí paprsek od referenční roviny. Výsledkem je odstranění soudkovitosti povrchu v horní části plochy a její zmenšení v dolní části (obr. 4.7). Dosažená drsnost (viz obr. 4.22) se opět nepatrně zvýšila v horní i dolní části povrchu, přičemž úkos se touto korekcí opět nemění (zhruba 1°).

U posledního vzorku (vzorek č. 4) byla navíc zapnuta korekce *Progressjet*, která vhodným naklápěním řezné hlavy zajišťuje odstranění veškerých tvarových a rozměrových nedostatků, které vznikají vlivem předchozích korekcí, a také úkosu povrchu od referenční roviny. Soudkovitost i v dolní části povrchu byla téměř odstraněna (obr. 4.9) a úkos byl zcela eliminován (tab. 4.5). Je ovšem nutno zdůraznit, že úkosy byly měřeny na setiny milimetrů a nelze tedy zcela vyloučit, že malý úkos není vytvořen. K podřezům v dolní části povrchu nedochází a výsledná drsnost povrchu zhruba odpovídá původně řezanému povrchu bez korekcí (viz obr. 4.22). Z obr. 4.21 je patrné, že naklopením řezné hlavy proti pohybu paprsku při řezání došlo ve spodní části povrchu ke zmenšení úhlu, při kterém paprsek materiál opouští (došlo ke zmenšení „ohybu“ paprsku v dolní části povrchu).

Vnitřní povrchy obrobků nebyly proměřovány profilometrem, pouze byly zjišťovány vnitřní rozměry v horní a dolní části kvůli určení úkosu povrchů. Výsledky jsou podobné, jako u vnějších ploch. Při zapnuté korekci *Materiálové řízení rychlosti* se objevila výrazná soudkovitost ve spodní části povrchu (viz. tab. 4.4, vzorek č. 2). Úkos kolem 1° se opět vyskytuje u vzorku bez korekce a u vzorků se zapnutým *Materiálovým řízením rychlosti* a *Dynamickou poloměrovou korekcí*. Korekce *Progressjet* pak úkos opět eliminuje (tab. 4.6).

Pokud se zaměříme na vertikální profily jednotlivých řezných povrchů (obr. 4.10 až 4.17), je patrné, že při vniknutí paprsku do materiálu v horní části povrchu dochází k vytvoření jakéhosi úkosu či zaoblení hrany, které se pak v nižších oblastech povrchů nevyskytují, pouze dochází k postupnému rozšiřování řezné spáry u daného materiálu za daných pracovních podmínek (viz obr. 4.10 až 4.17). Zaoblení se objevuje u všech zkoumaných vzorků a je zřejmé, že korekční systémy jej nejsou schopny odstranit. Při zapnutém *Materiálovém řízení rychlosti* je z obr. 4.13 patrný odstup profilu měřeného ve středu plochy (zelená křivka) od obou krajních profilů (modrá a červená křivka). To opět ukazuje na výraznou soudkovitost povrchu při této korekci (srov. obr. 4.5 a 4.13). U povrchu řezaného s použitím všech dostupných korekcí (obr. 4.16) je pak zřejmé, že soudkovitost i úkos byly odstraněny (obr. 4.17).

Závěr

Předkládaná bakalářská práce se zabývala nekonvenčními metodami obrábění se zaměřením na abrazivní vodní paprsek. V práci byly vysvětleny základní pojmy a proces obrábění. Byl popsán stroj, který je určen k řezání abrazivním vodním paprskem, používané typy paprsku a parametry ovlivňující hloubku a kvalitu řezu. Zvláštní pozornost byla věnována korekčním systémům, které mají za úkol zvýšit kvalitu řezné plochy, eliminovat některé nežádoucí průvodní jevy při řezání, případně zkrátit čas výroby obrobku. Cílem práce bylo zjistit, jak jednotlivé korekční systémy ovlivňují rozměrovou přesnost a kvalitu obrobku. Pro tyto účely byly vytvořeny tři vzorky, při jejichž výrobě bylo použito rozdílných korekčních systémů. Pro zjištění případného vlivu korekčních systémů byl vyroben také jeden vzorek bez použití jakýchkoli korekcí.

Jednotlivé korekční systémy byly navrženy jako ucelený systém, který má odstranit některé nežádoucí projevy paprsku na řezné ploše (podřezy v dolní části, soudkovitou povrchu, úkos apod.). Řídicí systém řezného stroje však umožňuje použití jednotlivých korekcí i samostatně. Bylo zjištěno, že u vzorku s použitým Materiálovým řízením rychlosti dochází k eliminaci podřezů v dolní části obrobku, důsledkem je však vznik výrazné soudkovitosti řezné plochy na začátku a na konci řezu, neboť v těchto místech dochází ke snížení rychlosti řezání. Soudkovitost povrchu odstraňuje Dynamická poloměrová korekce, kdy se paprsek na začátku a na konci řezu nepatrně oddálí od požadované trajektorie. Korekce Progressjet pak naklápěním řezné hlavy odstraňuje úkos řezného povrchu.

Bakalářská práce ukázala, že korekční systémy fungují dle předpokladu a odstraňují nežádoucí vlivy abrazivního vodního paprsku na řeznou plochu při 2D řezání. Takovéto korekční systémy jsou dnes již standardem u prodáváných strojů a zařízení pro řezání technologií abrazivního vodního paprsku. Tvůrci korekčních systémů udávají, že přesnost systémů se bude v budoucnu zvyšovat postupným zlepšováním algoritmů a zpětnou vazbou aplikovanou na konkrétní materiály.

Eliminace nežádoucích fyzikálních projevů paprsku a zvýšení kvality řezné plochy umožní zkrácení doby nutné k výrobě obrobku až o 20%, podle složitosti řezaného tvaru a použitého materiálu. [30]

Zmenšením úkosu řezného povrchu od referenční roviny navíc odpadne nutnost dalšího dodatečného opracování obrobku např. broušením apod. Vhodným nastavením

parametrů řezání a použitím korekčních systémů je tak možno zvýšit nejen produktivitu výroby ale také kvalitu řezné plochy. I přes vyšší cenu řezného stroje vybaveného korekčními systémy je ekonomický přínos při výrobě nesporný.

Seznam použité literatury

- [1] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [2] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice : Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [3] KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001. 275 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [4] PÍŠKA, Miroslav at al. *Speciální technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [5] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [6] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava; LANGER, Ivo. *Nekonvenční technologie*. Havlíčkův Brod : FRAGMENT, 1998. 164 s. ISBN 80-720-0296-1.
- [7] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrabania*. Žilina : Žilinská univerzita, 2001. 167 s. ISBN 80-2100-853-2
- [8] JANÁČ, Alexandr; BÁTORA, Bohumil; BARÁNEK, Jan at al. *Technológia Obrábania*. Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2004. 288 s. ISBN 80-227-2031-3.
- [9] Flow international Corporation [online]. 2014 [cit. 2014-03-13]. Technologie řezání vodním paprskem. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem-26/>>.
- [10] WILKINS, Christopher. Waterjet Cutting: The Other “Non-Traditional” Process. *Omax* [online]. s. 11-16 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <<http://www.omax.com/pdfs/WATERJETCUTTING.pdf>>.

- [11] Bystronic [online]. [cit. 2014-03-13]. Water jet cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.bystronic.com/en/technology/waterjetcutting.php>>.
- [12] WCM [online]. [cit. 2014-03-13]. Princip řezání. Dostupné z WWW: <<http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>>.
- [13] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava : Miroslav Mračko, 1998. 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [14] FOLDYNA, Josef. Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti? *Vesmír* [online]. Prosinec 2013 [cit. 2014-03-13]. Dostupné na WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti>>.
- [15] CHPS [online]. [cit. 2014-03-13]. Vodní paprsek. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena>>.
- [16] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. Prešov : Fakulta výrobných technológií TU, 2008. 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [17] DVOŘÁKOVÁ, Jana; DVOŘÁK, Jaromír. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Glassrevue* [online]. Červenec 2008 [cit. 13. března 2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>>.
- [18] DVOŘÁKOVÁ, Jana; DVOŘÁK, Jaromír. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Duben 2007 [cit. 13. března 2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>>.
- [19] PTV. Hostivice. Manuál ovládání řídicího systému pro operátora (základní část – od vygenerování programu do procesu řezání).
- [20] PTV [online]. 2006 [cit. 2014-03-13]. Progressjet. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/jnp/cz/produkty/stroje_vodni_paprsek/WJxxyy_nZ_D_ProgressPro/Progress_jet_folder.html>.

- [21] INOX, spol. s r. o. [online]. [cit. 2014-03-13]. Nerezový hutní materiál. Dostupné z WWW: <<http://www.inoxspol.cz/nerezove-materialy-druhy-vlastnosti-jakosti-inox-rubrika.html>>.
- [22] ALFUN [online]. [cit. 2014-03-13]. Převodní tabulka norem a základní mechanické vlastnosti. Dostupné z WWW: <<http://www.alfun.cz/sortiment/ocel>>.
- [23] ZELENÁK, Michal. *Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace*. Disertační práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta Hornicko-geologická. 110s.
- [24] OHLÍDAL, Miloslav. *Optické metody hodnocení textury povrchu v mikrometrové oblasti*. Brno : Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT. Dostupné z WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/46_Ohlidal_VUTBR.pdf>.
- [25] Vodní paprsek [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>.
- [26] Bystronic [online]. [cit. 2014-03-13]. Water jet cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.bystronic.com/en/technology/waterjetcutting.php>>.
- [27] BARALIĆ, Jelena; NEDIĆ, Bogdan; JANKOVIĆ, Predrag. Maching parameters effect on the jet retardation in abrasive water jet machining. In *34th International conference on production engineering*. Niš, 28. - 30. September 2011. Sborník [online]. 2011 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://paperedu.org/docs/index-351.html>>.
- [28] KRAJNÝ, Zdenko. *Vysokotlaký vodný lúč*. Bratislava : Nakladatelství STU, 2011. 160 s. ISBN 978-80-227-3535-3
- [29] VAŠEK, J.; FIALOVÁ, V.; FOLDYLA, J.: Mechanismus rozpojování hornin vysokotlakým vodním médiem. *Výroční zpráva*, HOÚ ČSAV Ostrava, 1986.
- [30] SITEK, L.; FOLDYNA, J.; KLICH, J.; HLAVÁČEK, P. Zkoušky kvality řezné plochy při řezání technologií AWJ. *Výzkumná zpráva k HS* (v rámci Podpory vědy a výzkumu v MSK v roce 2010), Ústav geoniky, AV ČR, v. v. i., 2010.

- [31] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. Nové směry v progresivním obrábění. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [32] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [33] SUMMERS, D.A. Waterjetting Technology. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [34] LABUS, T. J. (ed.). Fluid Jet Technology-Fundamentals and Applications.WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.
- [35] SITEK, L. Osobní sdělení, 9.5.2014.
- [36] PROEX 2000 [online]. [cit. 2014-03-13]. Plechy nerezové – jakostní. Dostupné z WWW: <<http://www.proex2000.cz/plechy-nerezove-jakosti.aspx>>